

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Jean Paul Schlegel

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AVALIAÇÃO
DE ESTADORES SOB CAMPOS ROTACIONAIS**

Florianópolis

2011

Jean Paul Schlegel

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AVALIAÇÃO
DE ESTADORES SOB CAMPOS ROTACIONAIS**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação da Universidade Federal
de Santa Catarina para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Florianópolis

2011

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE ESTADORES SOB CAMPOS ROTACIONAIS

Jean Paul Schlegel

‘ Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, *Área de Concentração em Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos* e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina. ’

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr. – UFSC
Orientador

Prof. Roberto de Souza Salgado, Dr. – UFSC
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr. – UFSC
Presidente

Prof. Nelson Sadowski, Dr. – UFSC – Co-orientador

Prof. Pedro Armando da Silva Jr, Dr. – IFSC

Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr. – UFSC

Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr. – UFSC

Eng. Aleandro Amauri de Espindola, M.Sc. – EMBRACO

Este trabalho é dedicado a toda a minha família,
em especial aos meus pais, Lauro e Elira, pela
forma como conduziram minha educação e por
terem me proporcionado boas condições de estudo.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível graças à cooperação de diversas pessoas, entidades e empresas as quais gostaria de agradecer:

Ao meu orientador, Prof. Dr. Nelson Jhoe Batistela, pelo convite e voto de confiança, por apoiar e acompanhar todos os estágios de desenvolvimento, pelo conhecimento transmitido e principalmente pela amizade construída durante estes anos;

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Nelson Sadowski, pelo apoio e sugestões nos momentos de dúvida;

Aos demais professores, membros da banca de avaliação, Dr. Pedro Armando da Silva Júnior, Dr. João Pedro Assumpção Bastos e Dr. Patrick Kuo-Peng, pelas discussões e sugestões que contribuíram com a finalização deste trabalho;

Aos professores do GRUCAD, por compartilharem seus conhecimentos e por proporcionarem um ambiente agradável e harmonioso para o desenvolvimento dessa dissertação;

A empresa EMBRACO, pelo suporte financeiro, fornecimento de dados e amostras para realização dos ensaios, em particular ao Eng. Aleandro A. de Espíndola, pela paciência e atenção dispensada durante o desenvolvimento deste trabalho, além da participação na banca de avaliação;

A todos os colegas de laboratório, em especial, Maurício Rigoni e Afrânio de Castro A. Junior, por suas contribuições, sugestões e auxílio durante a montagem da bancada, além de tornarem nosso ambiente de trabalho mais descontraído;

Ao estudante de graduação em engenharia elétrica, Vinicius Ribeiro Nledzwiecki, pela elaboração dos programas de geração e aquisição de sinais e pelo auxílio durante os testes com a bancada desenvolvida.

A FINEP, pela aprovação e suporte concedido ao projeto;

A Celly D. Mello, secretária executiva, pela atenção e prontidão sempre concedidas;

A minha família, meu pai Lauro, minha mãe Elira e meu irmão John, por todo suporte e compreensão prestados durante estes anos de estudo.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE ESTADORES SOB CAMPOS ROTACIONAIS

Jean Paul Schlegel

Março / 2011

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Co-Orientador: Prof. Nelson Sadowski, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos
Eletromagnéticos.

Palavras-chave: Perdas magnéticas, campos rotacionais, testes em
pacotes de estadores, comparação entre métodos de ensaio.

Número de Páginas: 75.

RESUMO: Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de uma bancada experimental para ensaios de estadores montados sob campos rotacionais. A bancada trabalha associada a um dispositivo eletromagnético, desenvolvido pelo GRUCAD em conjunto com a empresa EMBRACO, chamado por *core tester*, onde os estadores são acoplados. São realizados testes em amostras de três tipos diferentes de aços, levantando-se principalmente seus valores de perdas magnéticas. Outras maneiras de avaliação de desempenho eletromagnético dos três aços são realizadas. Os aços são comparados entre si em três métodos experimentais de testes: bancada desenvolvida, através do quadro de Epstein e através de um método chamado por *ring coil*. Ensaios dos estadores em motores com o dinamômetro também são apresentados, estabelecendo-se um valor de referência de desempenho para cada material estudado. Outras possibilidades de utilização da bancada experimental são apresentadas, como o seu uso na detecção de defeitos de fabricação em pacotes de estadores montados.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

Title

Jean Paul Schlegel

March / 2011

Advisor: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Co-Advisor: Prof. Nelson Sadowski, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices.

Keywords: Magnetic losses, rotational fields, tests in sheet packages of stators, comparison between test methods.

Number of pages: 75.

ABSTRACT: This dissertation describes the development of an experimental device for testing mounted stators under rotational fields. The workbench operates in conjunction with an electromagnetic device, developed by GRUCAD together with EMBRACO called core tester, where the stators are coupled and tested. Tests are performed on samples of three different types of steels, mainly aiming to obtain their magnetic losses values. Other ways of evaluating the performance of the three electromagnetic steels are also made. The steels are compared in three experimental methods of testing: the developed workbench, the Epstein frame and through a method called ring coil. Tests with a dynamometer were also conducted in order to establish a benchmark of performance for each tested material. Finally, other possibilities for using the workbench are presented, for example, its use for detecting manufacturing defects on mounted stators.

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	XV
ABREVIATURAS	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 O AÇO PARA APLICAÇÕES ELÉTRICAS	5
2.2 PROCESSOS METALÚRGICOS DO AÇO	6
2.2.1 Processo de Estampagem	6
2.2.2 Tratamento Térmico.....	6
2.3 PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ALTERNADOS.....	7
2.4 AS MEDIÇÕES DE PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ALTERNADOS	8
2.4.1 Quadro de Epstein.....	8
2.4.2 Ring Coil.....	10
2.5 PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ROTACIONAIS.....	11
2.6 AS MEDIÇÕES DE PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ROTACIONAIS.....	15
2.7 DINAMÔMETRO	18
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
3 APARATO EXPERIMENTAL.....	21
3.1 BLOCO FUNCIONAL I: SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO E PROTEÇÃO	22
3.2 BLOCO FUNCIONAL II: RETIFICAÇÃO E FILTRAGEM	23
3.3 BLOCO FUNCIONAL III: INVERSOR DE TENSÃO	23
3.4 BLOCO FUNCIONAL IV: AQUISIÇÃO, SINAIS E CONTROLE.....	24
3.5 INSTRUMENTOS VIRTUAIS.....	26
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
4 TESTES INICIAS.....	31
4.1 IMPOSIÇÃO DE CAMPO GIRANTE	32
4.2 REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS	35

4.3	MEDIÇÃO DE CAMPOS NO ESTATOR	38
4.4	IMPOSIÇÃO DE DEFEITOS NO ESTATOR.....	40
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
5	ESTUDO E ANÁLISE DE AÇOS UTILIZADOS EM ESTADORES.....	47
5.1	ENSAIOS COM O QUADRO DE EPSTEIN	49
5.2	ENSAIOS COM O RING COIL.....	51
5.3	ENSAIOS COM A BANCADA EXPERIMENTAL.....	53
5.4	ENSAIOS COM O DINAMÔMETRO	56
6	CONCLUSÃO.....	59
7	BIBLIOGRAFIA	61
8	ANEXOS	63
8.1	RESULTADOS OBTIDOS PARA O MATERIAL M1 COM A BANCADA EXPERIMENTAL	63
8.2	RESULTADOS OBTIDOS PARA O MATERIAL M2 COM A BANCADA EXPERIMENTAL	64
8.3	RESULTADOS OBTIDOS PARA O MATERIAL M3 COM A BANCADA EXPERIMENTAL	65
8.4	ESQUEMAS DE LIGAÇÃO DAS PLACAS	66
8.4.1	Circuito de Potência.....	66
8.4.2	Circuito de Retificação e Filtragem.....	67
8.4.3	Sistema de Alimentação e Proteção	68
8.4.4	Temporizador	69
8.4.5	Circuito de Aquisição	70

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

B	- Indução Magnética [T]
Br	- Indução Magnética no sentido radial [T]
Bt	- Indução Magnética no sentido transversal [T]
Bx	- Indução Magnética no eixo X [T]
By	- Indução Magnética no eixo Y [T]
<i>f</i>	- Frequência [Hz]
<i>h</i>	- Altura do pacote do estator [mm]
H	- Campo Magnético [A/m]
Hx	- Campo Magnético no eixo X [A/m]
Hy	- Campo Magnético no eixo Y [A/m]
ip	- Corrente no enrolamento primário [A]
ix	- Corrente no eixo X [A]
iy	- Corrente no eixo Y [A]
<i>Im</i>	- Caminho médio magnético [m]
<i>m</i>	- Massa da amostra [kg]
<i>N</i>	- Número de Espiras [espiras]
<i>Np</i>	- Número de Espiras do primário [espiras]
<i>Ns</i>	- Número de Espiras do secundário [espiras]
Px	- Perdas Magnéticas no eixo X [W/kg]
Py	- Perdas Magnéticas no eixo Y [W/kg]
S	- Área da Seção transversal [m ²]
Vp	- Tensão de pico [V]
Vx	- Tensão no eixo X [V]
Vy	- Tensão no eixo Y [V]

ABREVIATURAS

CC	- Corrente Contínua.
CSV	- Comma Separated Value.
EMBRACO	- Empresa Brasileira de Compressores.
<i>FeSi</i>	- Ferro-Silício.
<i>f.m.m</i>	- Força Magnetomotriz.
GNO	- Grão Não Orientado.
GO	- Grão Orientado.
IGBT	- Insulated Gate Bipolar Transistor.
M1	- Amostra do Material 1.
M2	- Amostra do Material 2.
M3	- Amostra do Material 3.
PWM	- Pulse Width Modulation.
SST	- Single Sheet Tester.
USB	- Universal Serial Bus.
VI	- Virtual Instrument.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica, a necessidade de investimentos associados e a preocupação com o meio ambiente, aliados à necessidade de se adequar às normas e baixar os custos de produção para enfrentar um mercado cada dia mais competitivo, fez com que alguns fabricantes de máquinas elétricas demonstrassem uma maior preocupação com o projeto e rendimento de seus produtos.

Um dos fatores determinantes da eficiência energética de dispositivos eletromagnéticos é a perda no núcleo magnético. As chapas de aço para fins elétricos são os materiais mais utilizados nesta indústria em termos de volume.

A necessidade de não depender apenas de dados costumeiramente fornecidos pelas indústrias de beneficiamento de aço, o aparecimento de novos materiais e o desenvolvimento de novos processos produtivos, levaram empresas a investir em departamentos especializados na realização de testes para caracterizar ou aferir a qualidade do aço para fins eletromagnéticos. Estes departamentos se tornaram importantes, pois levantam dados economicamente valiosos para as empresas, fornecendo requisitos para negociações de compra e venda, parâmetros para projetos futuros e dados associados ao controle de qualidade dos materiais.

1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Em muitos casos, não apenas a realização de ensaios de caracterização do aço se torna importante, mas também a rapidez com que estes são realizados. Muitas vezes o departamento de compras depende dos resultados destes ensaios para decidir sobre a aquisição de matéria prima. Esta é uma área que movimenta grandes volumes de material e quantias financeiras elevadas, onde qualquer erro pode ter um custo muito alto.

No setor de máquinas elétricas, especialmente o de motores, o teste do dinamômetro fornece os melhores resultados no que diz respeito ao rendimento final do produto, por exemplo. Porém, para a realização deste tipo de teste, é necessário um longo processo desde a obtenção das amostras, estampagem das lâminas, bobinagem e montagem do estator para finalmente realizar os ensaios. Geralmente o tempo para a tomada de decisões de compra é curto para ser

baseada nestes resultados, tornando este processo inviável em muitos casos.

Uma alternativa bastante utilizada é o quadro de Epstein, onde o material é ensaiado com poucas amostras na forma de tiras retangulares. Por ser um processo simples e rápido, possuir normas específicas e apresentar resultados com boa reprodutibilidade, o quadro de Epstein tornou-se referência e é o mais utilizado na caracterização de materiais magnéticos moles laminados.

A desvantagem deste método, em comparação com o dinamômetro, é o fato de não utilizar as lâminas no seu formato final usadas na montagem dos motores. O quadro de Epstein, por aplicar apenas campos magnéticos alternantes, não contempla todas as direções de magnetização no material, deixando de medir parcelas de perdas associadas principalmente à anisotropia magnética do material.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e montar uma bancada experimental que possa ensaiar pacotes de lâminas de estatores montados em seu formato final de utilização. A bancada é dotada de um dispositivo magnético que facilita a inserção e o ensaio dos pacotes visando à diminuição do tempo total de caracterização de cada amostra. Para simular condições as mais próximas possíveis do funcionamento real do motor, a bancada deverá aplicar campos rotacionais ao material a fim de submeter todo o estator – coroa e dentes - à indução magnética.

Outro objetivo é realizar uma comparação dos resultados obtidos com a bancada experimental com os fornecidos pelos métodos mais tradicionais, como o quadro de Epstein, o *ring coil* e o dinamômetro.

1.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido às diferenças de abordagem de cada método de ensaio, que serão discutidas mais adiante, os resultados obtidos não podem ser comparados diretamente entre si. Porém, é possível avaliar o desempenho que cada amostra de material apresentou dentro de um mesmo tipo de ensaios e comparar com o seu desempenho geral obtido nos demais métodos. Deste modo, é possível estabelecer uma

comparação qualitativa do rendimento de cada material e não uma comparação quantitativa do valor das perdas em W/kg.

Após o término de todos os ensaios com amostras de estatores montados, amostras de cada material utilizado na confecção dos estatores foram enviadas para que a empresa EMBRACO bobinasse e montasse estatores, os quais foram testados com o dinamômetro. Estes resultados foram muito importantes, pois serviram como referência na comparação dos rendimentos obtidos com métodos de ensaio aplicados neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta brevemente o aço como matéria prima em aplicações elétricas e discorre sobre seus aspectos físicos, características magnéticas e processos metalúrgicos de estampagem e tratamento térmico. Por determinar a qualidade do aço, será dada atenção especial às perdas magnéticas e serão vistas quais características influenciam no seu aparecimento, além da apresentação de métodos de medição dessas perdas.

2.1 O AÇO PARA APLICAÇÕES ELÉTRICAS

O aço, geralmente na forma de ligas como a de ferro-silício (*FeSi*), constitui a principal matéria prima empregada na indústria de dispositivos elétricos como máquinas rotativas e transformadores. É mais comumente utilizado na forma de chapas obtidas através da laminação e estampagem de blocos de aço de diversas espessuras.

O processo de laminação provoca um grau de anisotropia magnética que depende do material e do processo em si. Podemos separar as ligas de *FeSi* em dois grupos: (a) materiais isotrópicos, que apresentam as mesmas características magnéticas em qualquer direção no plano da lâmina. Comercialmente são denominadas como chapas de grãos não orientados (GNO), sendo utilizadas em máquinas rotativas e em pequenos transformadores; e (b) materiais anisotrópicos, que apresentam propriedades distintas para diferentes direções do plano da lâmina. Comercialmente são conhecidas como chapas de grãos orientados (GO) e são utilizadas em transformadores de potência.

Pode-se ainda classificar os aços de acordo com outras características das quais as mais importantes, tomadas como parâmetro de seleção de aços, são a permeabilidade magnética e as perdas magnéticas. Estas características definem a qualidade do material empregado e estão diretamente ligadas ao rendimento e ao tamanho de uma máquina elétrica.

Muitas pesquisas se desenvolveram nas últimas décadas visando melhorias tanto dos processos produtivos quanto das características magnéticas do aço para fins elétricos. Estas pesquisas se mostraram muito importantes frente a um mercado que cada vez mais exige produtos de baixo custo e alta eficiência.

2.2 PROCESSOS METALÚRGICOS DO AÇO

O aço é entregue pelas grandes siderúrgicas na forma de bobinas as quais precisam ser recortadas em formatos típicos do circuito magnético desejado. Até o aço chegar à forma de lâminas para montagem final, ele passa por alguns processos dos quais vamos abordar os principais: estampagem e tratamento térmico.

2.2.1 Processo de Estampagem

O processo de estampagem consiste no recorte das chapas provenientes de grandes bobinas em pequenas lâminas que serão utilizadas na montagem de dispositivos eletromagnéticos.

As bobinas entram em máquinas que prensam a chapa contra uma matriz que efetua o corte no formato desejado. Este processo cria tensões mecânicas nas áreas de corte que alteram a microestrutura do material, afetando assim suas propriedades como a permeabilidade e as perdas magnéticas [1].

2.2.2 Tratamento Térmico

Conhecida também como recozimento, esta é a última etapa do processo de fabricação das lâminas para fins elétricos. Quando o material não é totalmente processado, esta etapa geralmente é realizada pelo próprio fabricante de máquinas elétricas, pois necessita do material já estampado para sua realização.

O tratamento térmico reduz as perdas magnéticas e aumenta a permeabilidade do material, pois ajuda no alívio das tensões mecânicas causadas durante o corte, proporciona a recristalização e o crescimento dos grãos, reduz o teor de carbono e forma uma camada dielétrica superficial na chapa [1].

Esta etapa é realizada sempre após a estampagem, justamente para aliviar as tensões introduzidas durante o corte. Como este processo atua apenas na estrutura dos grãos magnéticos apenas as perdas por histerese são afetadas, a parcela referente às perdas dinâmicas permanece inalterada [1].

2.3 PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ALTERNADOS

Considerada como uma das principais características que determinam a qualidade do aço para fins elétricos, as perdas magnéticas tem sido alvo constante de estudos, não apenas por não existir ainda um modelo definitivo para sua previsão, mas principalmente porque influenciam diretamente no rendimento e no custo final de um dispositivo eletromagnético.

As perdas magnéticas podem ser obtidas através do laço $B(H)$ do material. A energia dissipada por ciclo e por unidade de volume é determinada através do cálculo da área interna do laço, como mostra a Figura 2.1.

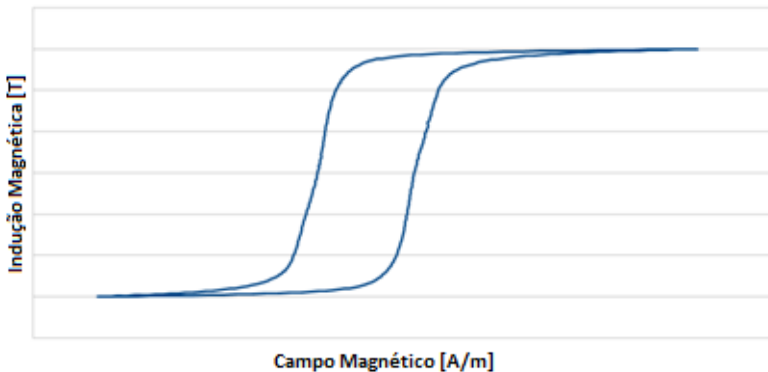


Figura 2.1 - Laço $B(H)$.

Atualmente considera-se que as perdas totais num material são compostas por três termos: perdas por histerese, perdas devido às correntes de Foucault e perdas excedentes [2][3].

As perdas por histerese estão ligadas diretamente à microestrutura metalúrgica do aço. A magnetização do material acontece pela movimentação e rotação de seus domínios magnéticos. Estes domínios são constituídos por spins de elétrons, delimitados por paredes, que estão orientados numa mesma direção. A energia gasta na movimentação destas paredes corresponde às perdas por histerese [4]. A quantidade e o tamanho dessas paredes, assim como defeitos na microestrutura do material, determinam o valor da perda. Esta parcela

de perda não depende da frequência e deve ser medida com frequências baixas onde as componentes dinâmicas da perda podem ser desprezadas. As perdas dinâmicas são compostas pelas perdas devido às correntes de Foucault e pelas perdas excedentes.

As perdas devidas às correntes de Foucault são originadas por correntes induzidas. Estas correntes circulam perpendicularmente ao plano do fluxo, na forma de anéis fechados, e são induzidas pela variação do fluxo magnético no material. A utilização do material na forma de lâminas dificulta a formação desses anéis de corrente, diminuindo assim as perdas por correntes de Foucault [5].

As perdas excedentes são originadas pelo excesso de correntes induzidas além daquelas calculadas por procedimentos clássicos. A justificativa para a existência destas perdas excedentes baseia-se no fato de que o cálculo clássico das perdas por correntes de Foucault não considera a divisão do material em domínios magnéticos elementares. Estes domínios modificam a distribuição das correntes induzidas, aumentando as perdas. Várias teorias foram construídas para avaliar estas perdas chamadas excedentes. A mais aceita atualmente foi proposta por Bertotti [2], baseada em uma análise estatística da organização dos domínios e paredes magnéticas. O modelo de Bertotti permite mostrar que estas perdas em J/kg são proporcionais à raiz quadrada da frequência.

2.4 AS MEDIÇÕES DE PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ALTERNADOS

Existem algumas formas de se determinar as perdas magnéticas no ferro experimentalmente, dentre elas podemos citar: o quadro de Epstein e o *ring coil*, que serão utilizadas neste trabalho. Cada método será abordado mais aprofundadamente a seguir, porém os princípios utilizados por cada um no levantamento das perdas são semelhantes.

2.4.1 Quadro de Epstein

O Quadro de Epstein é um transformador constituído por dois enrolamentos distribuídos igualmente em quatro braços formando um quadrado. O enrolamento primário de N_p espiras é responsável pela

excitação do dispositivo, gerando o campo magnético $H(t)$ no circuito magnético de comprimento padrão, $l_m = 0,94$ m, por meio da corrente $i_p(t)$. O enrolamento secundário de N_s espiras é utilizado para a medição do fluxo magnético e para o controle da forma de onda da tensão induzida $v_s(t)$. Controlando-se a forma de onda da tensão no secundário, mantém-se a forma de onda do fluxo conforme o desejado. O campo magnético é calculado por meio de (2.1). A indução magnética $B(t)$ é dada por (2.2), onde S é a seção magnética efetiva de material magnético [5]. Há também um conjunto de enrolamentos com a função de compensar o fluxo disperso entre as bobinas primária e secundária. A Figura 2.2 mostra o quadro de Epstein utilizado neste trabalho.

$$H(t) = \frac{N_p}{l_m} i_p(t) \text{ [A/m]} \quad (2.1)$$

$$B(t) = \frac{1}{N_s S} \int v_s(t) dt \text{ [T]} \quad (2.2)$$



Figura 2.2 - Quadro de Epstein utilizado nos ensaios.

O núcleo magnético do quadro de Epstein é formado pelas lâminas do material a ser analisado, sendo acondicionadas nos quatro braços, formando um circuito magnético fechado. Por norma, as lâminas são cortadas 50% no sentido longitudinal (L) e 50% no sentido transversal (T) à direção de laminação.

O quadro de Epstein é acoplado a um sistema de excitação, controle e medição. O aparato utilizado deste sistema é uma bancada que realiza ensaios normatizados, fabricada pela *Brockhaus Messtechnik*, modelo MPG100D [6]. Nesta bancada, as perdas são determinadas utilizando os seguintes dados de entrada no programa que executa a determinação das características magnéticas das amostras: peso total das amostras (g), densidade do material (g/cm^3), comprimento e largura da lâmina (mm), espessura da lâmina (mm) e número de lâminas ensaiadas (múltiplos de quatro).

O teste de Epstein é o mais utilizado e aceito na caracterização de materiais ferromagnéticos por ser um teste de baixa complexidade, apresentar resultados de alta reprodutibilidade e possuir normas específicas [7]. São os resultados deste teste que levam as empresas a optar ou não pela compra dos materiais. Em outras palavras, o teste de Epstein também serve como parâmetro para a escolha do aço e a valorização financeira do material magnético.

2.4.2 Ring Coil

O método *Ring Coil* é utilizado em ensaios de núcleos toroidais. Foi utilizado neste trabalho nos ensaios com os pacotes montados de lâminas de estatores [6]. Este teste possui os mesmos princípios do quadro de Epstein. As amostras são envolvidas por um cabo que contém as bobinas de primário e secundário, como mostra a Figura 2.3.

Para a determinação das perdas, os seguintes dados de entrada devem ser fornecidos ao programa da bancada MPG100D: peso do pacote (g), densidade do material (g/cm^3), diâmetro externo do pacote (mm), diâmetro interno do pacote (mm) e altura do pacote (mm).

Este tipo de teste não é normalizado e não possui bobinas de compensação de fluxo, o que insere possíveis erros de medição. O fluxo magnético possui sentido tangencial ao raio da peça. Neste caso de ensaios de estatores, o fluxo magnético não atravessa os dentes,

porém eles são considerados nos cálculos visto que contribuem no peso e nas dimensões do pacote. Assim, há incertezas relacionadas à quantidade precisa de material a ser utilizado na determinação dos valores das perdas magnéticas e à distribuição da densidade de fluxo na coroa do estator (variação do caminho médio magnético em função dos níveis de indução). Dessa forma, seus resultados serviram apenas para fins comparativos entre as amostras.

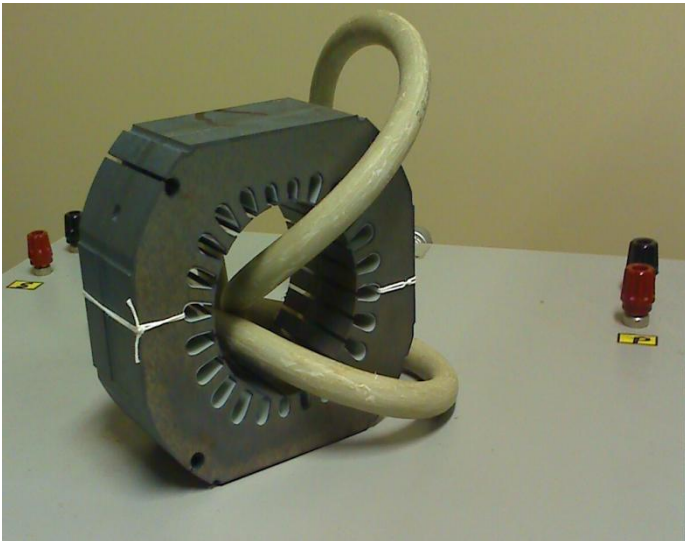


Figura 2.3. Estator sob ensaio no teste tipo *Ring Coil*.

2.5 PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ROTACIONAIS

Em alguns dispositivos eletromagnéticos, como em certas regiões de transformadores e na região entre dentes e ranhuras de máquinas elétricas, a indução magnética não possui apenas um comportamento alternante, mas também rotacional. Nesses casos a indução magnética muda de direção em diferentes pontos do material [8].

Para exemplificar esta situação, tomou-se como exemplo um polo de motor síncrono a ímãs permanentes, como mostra a Figura 2.4.

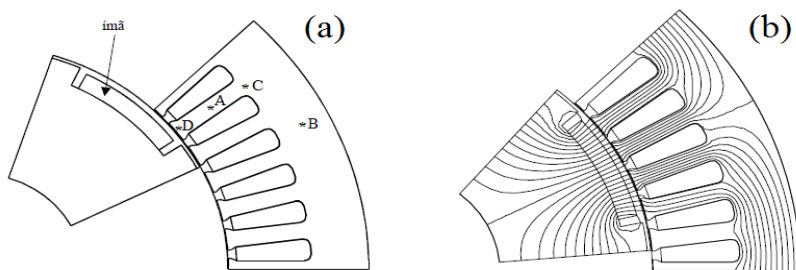


Figura 2.4 - Polo de um motor síncrono a ímãs permanentes. (a) Indicação dos pontos para análise do comportamento da indução. (b) Distribuição do fluxo magnético [8].

A seguir são mostrados gráficos, obtidos da referência [8], que apresentam o comportamento de componentes radiais e tangenciais (Br e Bt) em função da posição do rotor do motor síncrono. As figuras apresentam também laços $Bt(Br)$ das induções magnéticas nos pontos demarcados.

A Figura 2.5 mostra que no ponto “A” há apenas componentes radiais de indução magnética, cuja amplitude varia e apenas inverte o seu sentido conforme a posição do estator. Neste ponto podemos afirmar que a indução magnética é apenas alternante, Figura 2.5(b).

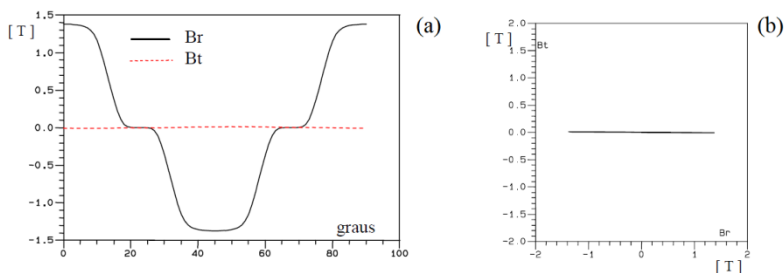


Figura 2.5 - Induções magnéticas radial e tangencial no ponto A : (a) Comportamento das induções em função da posição do rotor; (b) Laço $Bt(Br)$ das induções magnéticas [8].

As figuras a seguir mostram que nos pontos “B”, “C” e “D” têm-se, além da componente radial de indução magnética,

componentes tangenciais. Nesses pontos a indução magnética é alternante e rotativa ao mesmo tempo.

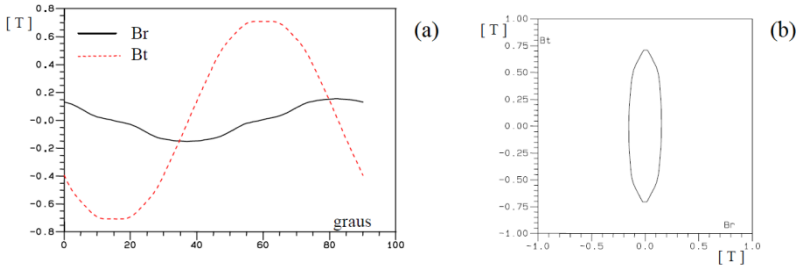


Figura 2.6 - Induções magnéticas radial e tangencial no ponto B : (a) Comportamento das induções em função da posição do rotor; (b) Laço $B_t(B_r)$ das induções magnéticas [8].

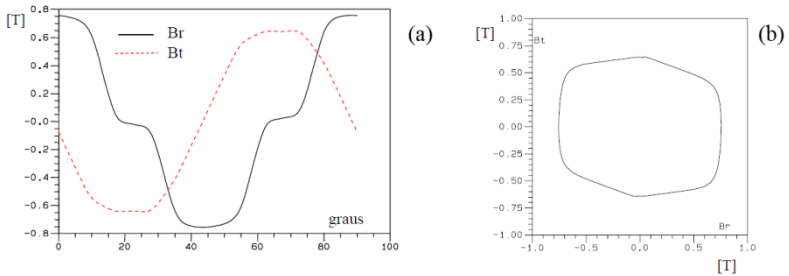


Figura 2.7- Induções magnéticas radial e tangencial no ponto C : (a) Comportamento das induções em função da posição do rotor; (b) Laço $B_t(B_r)$ das induções magnéticas [8].

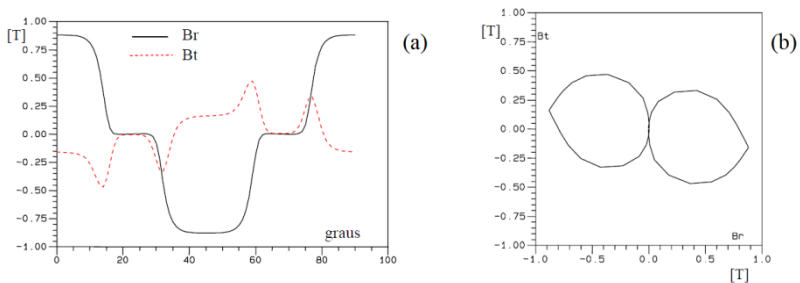


Figura 2.8- Induções magnéticas radial e tangencial no ponto D : (a) Comportamento das induções em função da posição do rotor; (b) Laço $B_t(B_r)$ das induções magnéticas [8].

Durante ensaios de perdas por histerese em 1908, P. Weis relatou que para um campo rotacional havia um aumento de perdas com o incremento da indução, seguido de um decréscimo das perdas até chegar a zero durante a saturação do material. Os ensaios foram realizados em um pedaço de lâmina de níquel magnetizada em um meio quase estático [9].

Em 1939, um estudo realizado por F. Brailsford [4] demonstrou distintamente o comportamento de perdas magnéticas devidas a campos alternantes e a campos rotacionais. F. Brailsford realizou ensaios de torque em um disco de ferro silício de grãos orientados sob diversos níveis de campo magnético, de onde pôde estimar estas perdas. Os resultados, Figura 2.9, mostram que as perdas alternantes aumentam regularmente com o campo até a saturação, no mesmo tempo em que as perdas rotativas atingem um determinado pico e decaem até zero.

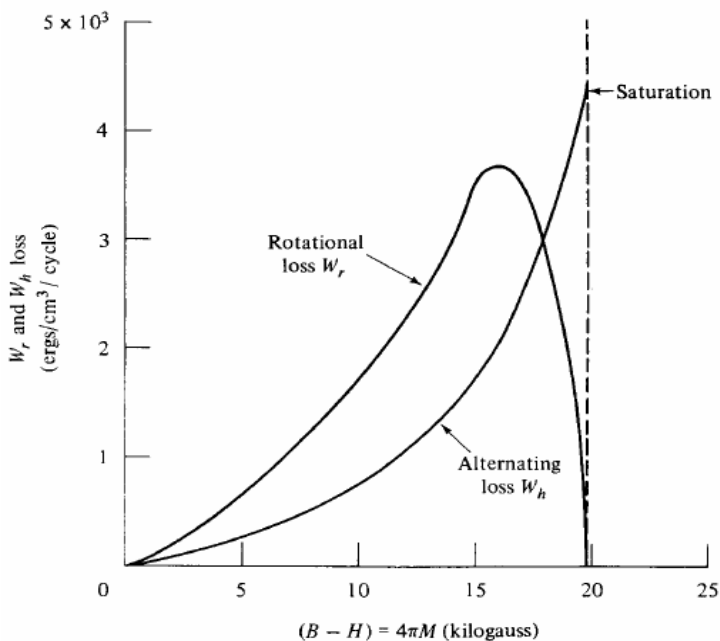


Figura 2.9 - Perdas alternante e rotacional em função do campo magnético [4].

2.6 AS MEDIÇÕES DE PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ROTACIONAIS

Para a medição das perdas magnéticas em campos rotacionais utilizou-se um dispositivo magnético, desenvolvido pelo GRUCAD e que fez parte da dissertação de mestrado de Yamamura [10], o qual é capaz de aplicar, num determinado estator, campos rotacionais próximos aos campos reais de funcionamento de um motor.

Este dispositivo é constituído de duas bobinas: uma primária e uma secundária. As bobinas envolvem o núcleo feito de aço silício de grão não orientado. O núcleo do *core tester* é construído de forma que o circuito magnético seja fechado pelas lâminas do estator que nele são acopladas. A Figura 2.10 mostra um estator acoplado ao dispositivo e, em detalhe, o núcleo e as cabeças de bobina do *core tester*.

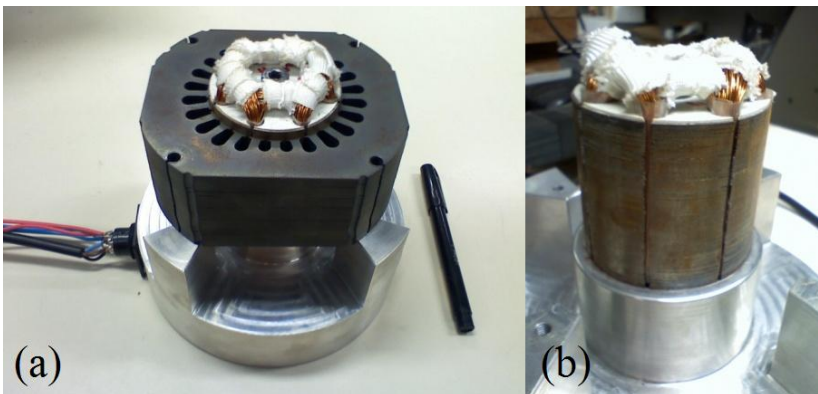


Figura 2.10 : (a) Estator acoplado ao *core tester* e (b) detalhe do núcleo do *core tester*.

O ensaio no *core tester* é baseado na abordagem experimental típica dos ensaios de Epstein, segundo os quais se aplica um valor de tensão no enrolamento primário, mede-se a corrente neste mesmo enrolamento e a tensão no enrolamento secundário (bobina de sonda de fluxo magnético). O campo e a indução magnética são obtidos através da corrente elétrica do enrolamento primário e da tensão elétrica do enrolamento secundário, respectivamente.

O dispositivo é composto por dois enrolamentos de excitação defasados de 90 graus no espaço e alimentados com tensões defasadas de 90 graus elétricos no tempo. Estas tensões têm suas formas de onda impostas pela bancada experimental de tal maneira que se tenha no circuito magnético sob teste induções na forma de onda senoidal, ou com outras formas de onda arbitradas (o que não é explorado neste trabalho). O controle da forma de onda do fluxo magnético é realizado através da bobina de sonda.

Para se obter uma força magnetomotriz (*f.m.m.*) com distribuição o mais senoidal possível no entreferro, foram utilizados enrolamentos distribuídos para cada eixo. Esta distribuição de enrolamentos resulta na atenuação de algumas componentes harmônicas [10]. Para conseguir uma distribuição da *f.m.m.* o mais senoidal possível seria necessário o maior número possível de ranhuras, o que é limitado em função do espaço do núcleo do dispositivo.

O projeto das ranhuras e dentes do protótipo foi feito conforme o formato do *core tester* e do estator a ser ensaiado. O número de ranhuras foi escolhido conforme o espaço disponível, ou seja, para cada três ranhuras no estator foi projetada uma ranhura no dispositivo, utilizando-se retas paralelas aos dentes do estator. Como o estator tem vinte e quatro ranhuras, o protótipo tem oito ranhuras igualmente espaçadas.

As ranhuras deveriam ser grandes o suficiente para se poder alocar o número de fios necessários para ensaiar (excitar) o estator, e pequenas o suficiente para dificultar a saturação do núcleo. Uma saturação grande do núcleo faz com que o ensaio não seja adequado às finalidades da pesquisa.

Com o número de ranhuras definido, foi decidido como seria o esquema de bobinagem para se obter um campo rotacional. Com a escolha de se utilizar enrolamentos distribuídos, foi determinado que todas as ranhuras seriam preenchidas tanto por enrolamentos de excitação (primário) dos dois eixos, como por enrolamentos sensores (secundário) dos dois eixos. A Figura 2.11 mostra como ficou o esquema de bobinagem, sendo que a “Fase 1” considera as bobinas para um eixo e “Fase 2”, as de outro eixo. Além disso, a denominação “Positiva” é onde as bobinas entram e “Negativa”, onde elas saem.

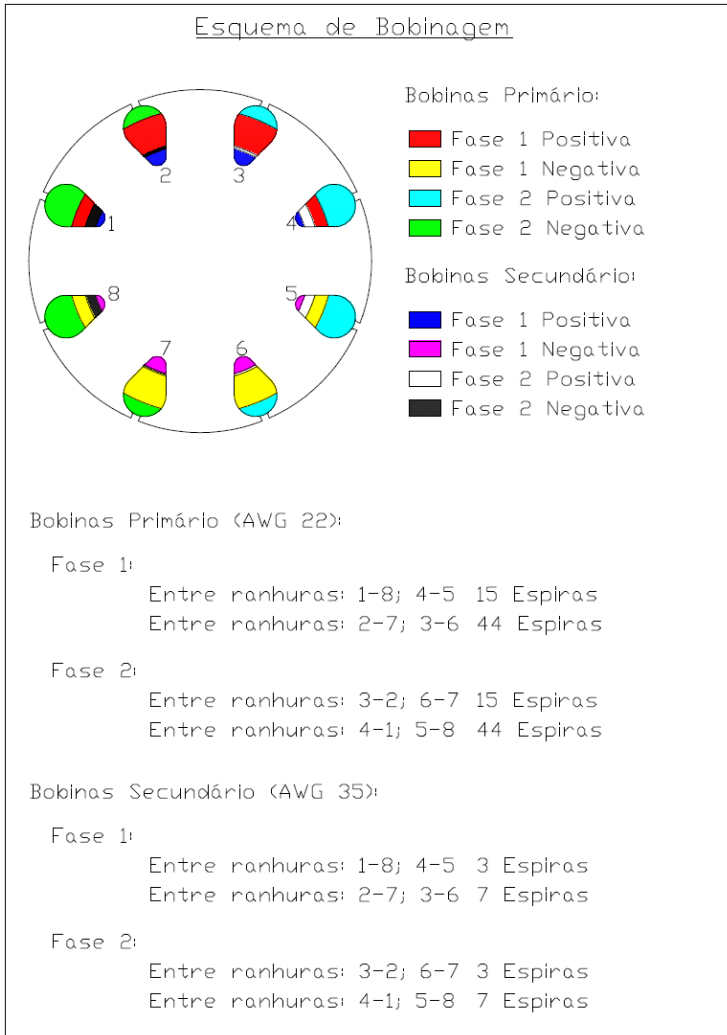


Figura 2.11 - Esquema de bobinagem do *core tester* [10].

Para obter uma *f.m.m.* com uma distribuição senoidal não basta apenas que os enrolamentos sejam distribuídos ao longo do dispositivo, é necessário que cada ranhura tenha uma porcentagem diferente de corrente de cada fonte de excitação [10]. Com esse objetivo, foi feito um cálculo da porcentagem de distribuição de cada bobina em cada ranhura. Para oito ranhuras, o resultado foi de que

haveria dois tipos de bobinas: umas maiores, ocupando 70% do total da ranhura destinado ao primário, e outras menores, ocupando os 30% restantes. Para as bobinas secundárias, foi utilizada a mesma distribuição utilizada para as bobinas primárias. A Figura 2.12 mostra como ficou a distribuição das bobinas primárias nas ranhuras.

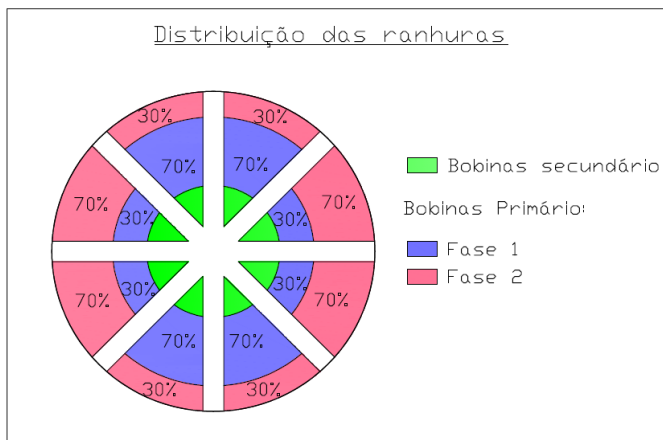


Figura 2.12 -Distribuição dos condutores nas ranhuras [10].

2.7 DINAMÔMETRO

O dinamômetro é um equipamento utilizado para medir força ou potência. No caso de motores elétricos, o dinamômetro impõe uma carga ao motor e mede a potência produzida. Esta carga pode ser um freio eletromagnético, um sistema hidráulico ou simplesmente outro motor acoplado ao eixo. Medindo a potência mecânica, fornecida no eixo, e a potência elétrica na entrada do motor, é possível calcular a eficiência do motor sob teste. Neste processo, diversas variáveis, como temperatura e tensão, precisam ser controladas, pois têm influência direta no resultado final de eficiência.

O dinamômetro utilizado pela EMBRACO e, portanto, para este trabalho, possui como carga um motor CC que impõe a rotação ao sistema. Desta forma, é possível medir as características de um motor em um ponto específico de rotação ou torque. A medição de torque é realizada através de uma célula de carga HBM [11]. Este sensor mede a força em um braço de alavanca. A rotação é medida por um *encoder Horner* [12]. Com a medição da força e da rotação, pode-se calcular a

potência mecânica. A potência elétrica é medida utilizando um wattímetro *Yokogawa*, que mede a tensão e a corrente que alimentam o motor. Nas figuras a seguir é possível visualizar o dinamômetro utilizado e, em detalhe, o estator em teste.



Figura 2.13 - Dinamômetro utilizado nos ensaios.

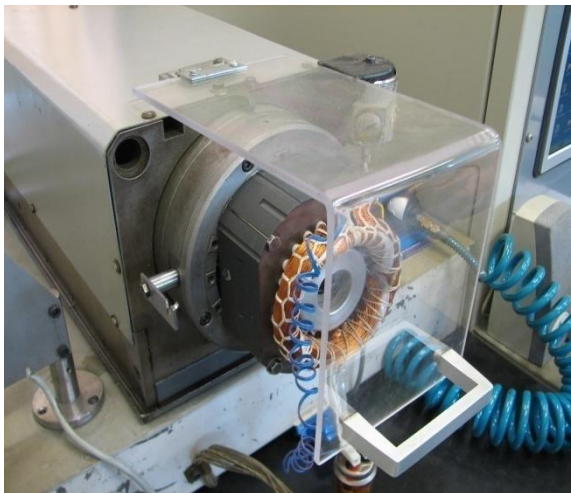


Figura 2.14 - Detalhe do estator acoplado ao dinamômetro.

Uma característica interessante do sistema utilizado é a ausência de rolamentos no motor. O suporte do estator é realizado através de um mancal hidrostático. Este mancal é projetado para ter perdas extremamente pequenas e estáveis. Assim, no teste realizado, o rotor padrão foi acoplado ao eixo do dinamômetro, e apenas os estatores sob teste foram trocados a cada ensaio.

Apesar de não fornecer diretamente o valor de perdas do material, o dinamômetro nos dá uma ideia geral do rendimento do estator montado com cada material. Estes resultados serão utilizados nas comparações com os resultados obtidos nos demais métodos de ensaio.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, além da revisão bibliográfica dos processos de fabricação do aço para fins elétricos e de suas características magnéticas, apresentou-se os métodos e dispositivos para medição de perdas tanto em campos magnéticos alternantes quanto em campos magnéticos rotacionais. Existem outros dispositivos capazes de medir perdas e caracterizar materiais, como o *Single Sheet Tester* (SST) [13], por exemplo, porém foram descritos apenas os métodos utilizados neste trabalho.

Apesar de o dinamômetro não pertencer diretamente aos métodos de caracterização de materiais magnéticos, ele foi apresentado, pois foi utilizado neste trabalho e seus resultados serão úteis durante as comparações e conclusões sobre os dados obtidos.

3 APARATO EXPERIMENTAL

O principal aparato desenvolvido durante este trabalho de mestrado foi a bancada experimental de alimentação do *core tester*. Tomando como base trabalhos precedentes realizados pelo GRUCAD, adaptou-se a bancada desenvolvida por Silva Júnior [14], utilizada para testes de chapas únicas sob campos rotacionais, para ensaiar pacotes de chapas de aço na forma de estatores.

As principais modificações desta nova bancada em relação à utilizada por Silva Júnior são:

- Adaptação da bancada de ensaios para trabalhar em conjunto com o *core tester*;
- Redimensionamento dos componentes de potência (diodos, transformadores, IGBTs, etc.) para maior fornecimento de corrente;
- Melhoria dos dispositivos de segurança a fim de proteger a bancada experimental e a rede comercial onde esta estiver ligada.
- Desenvolvimento de Instrumentos Virtuais – VIs - adequados a nova bancada.

Como em [14][15], a nova bancada de testes desenvolvida impõe um campo girante através de uma alimentação bifásica, com as formas de ondas do fluxo de cada eixo controladas e, conseqüentemente, a forma do campo girante. O controle impõe a forma de onda da derivada do fluxo, isto é, da tensão induzida em cada um dos sensores de indução magnética postos em cada eixo magnético do sistema. Este procedimento é muito mais rigoroso do que controlar a forma de onda do fluxo magnético, de modo a acondicionar o sistema dentro de um padrão de testes de alto nível [15].

Em conjunto com a bancada é utilizado o dispositivo magnético desenvolvido pelo GRUCAD em conjunto com a Embraco, que fez parte da dissertação de mestrado de lamamura [10], o qual é capaz de aplicar, num determinado estator, campos rotacionais próximos aos campos reais de funcionamento de um motor.

A bancada experimental foi montada na forma de um *rack* móvel com cinco divisões (prateleiras), onde cada divisão corresponde a um

bloco funcional. No decorrer deste capítulo são apresentados detalhadamente cada bloco que constitui a bancada experimental.

3.1 BLOCO FUNCIONAL I: SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO E PROTEÇÃO

A bancada é energizada a partir de uma rede elétrica comercial de 380 Volts / 60 Hz por meio de um cabo dotado de um plugue macho 3P+N+T e é dotada de um disjuntor termomagnético trifásico, cuja função é proteger a rede contra possíveis curtos-circuitos e sobrecorrentes na bancada.

O acionamento da etapa de potência é feito por uma botoeira que liga ou desliga um contator trifásico. Como a corrente de *inrush* no momento do acionamento da bancada é elevada (foram medidos picos de corrente de mais de 150 A), foi necessária a inclusão de um dispositivo temporizado com o objetivo de amortecer este pico de corrente, evitando assim que os disjuntores da rede e da própria bancada se desarmem. O dispositivo faz a pré-carga do sistema por meio de resistores de potência em série com a alimentação. Após um determinado tempo, o mesmo dispositivo faz o *bypass* desses resistores, retirando-os do circuito elétrico. Após esta etapa, o sistema alimenta um variador de tensão que vai aplicar o nível de tensão das etapas posteriores e um transformador trifásico que isola a bancada da rede comercial. Estas operações funcionais estão representadas pelos blocos da Figura 3.1.

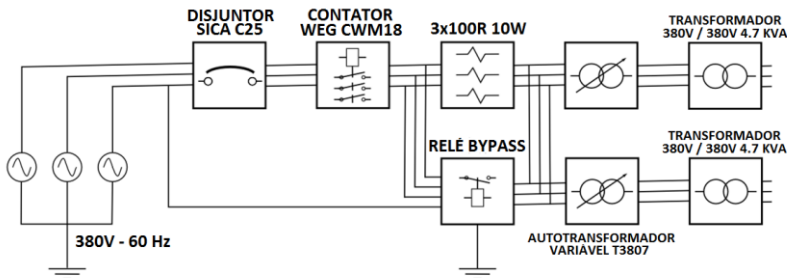


Figura 3.1: Bloco funcional I.

3.2 BLOCO FUNCIONAL II: RETIFICAÇÃO E FILTRAGEM

O segundo bloco funcional, apresentado pela Figura 3.2, é composto por uma ponte retificadora trifásica (ponte de Graetz) composta por diodos de potência, montados em dissipadores de calor, e por um filtro constituído por um banco de capacitores, de aproximadamente 19,6 mF ($35 \times 560\mu\text{F}$), e um indutor de 28 mH. Esta etapa trabalha em conjunto com o variador de tensão do bloco anterior e fornece, de maneira controlada pelo operador, o barramento de tensão DC que vai alimentar as etapas de potência posteriores. Foi tomado o cuidado de se adicionar neste banco alguns capacitores de poliéster para desacoplar possíveis ruídos de alta frequência provenientes da rede e da própria bancada experimental.

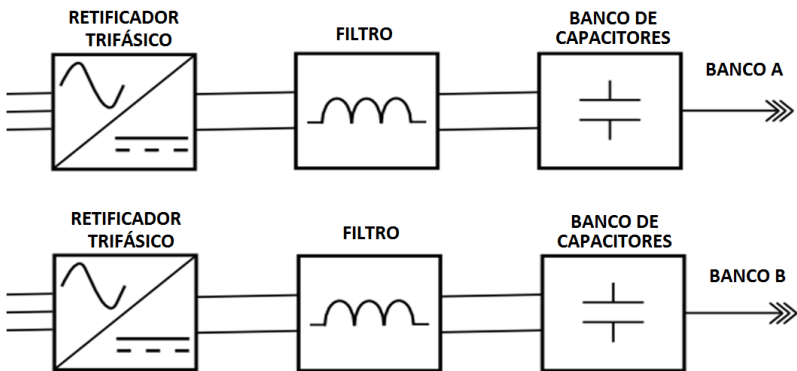


Figura 3.2 : Bloco funcional II.

3.3 BLOCO FUNCIONAL III: INVERSOR DE TENSÃO

O inversor de tensão é composto por dois módulos de IGBT's na configuração ponte completa. As chaves utilizadas foram montadas em uma placa à parte e fixadas sobre um dissipador de alumínio. Juntamente nesta placa foram colocados capacitores extras no barramento DC para atenuar o efeito indutivo dos cabos que ligam os dois blocos. Foram incluídos novamente alguns capacitores de poliéster para desacoplar possíveis ruídos de alta frequência ($>1\text{kHz}$) e para

compensar a inércia de corrente dos capacitores eletrolíticos do barramento DC. Nesta mesma placa está o indutor que juntamente com os capacitores AC vão formar o filtro de saída da etapa inversora. Este filtro retira o conteúdo PWM do inversor que está comutando em frequência fixa de 80 kHz.

A senóide gerada após o filtro (ou outra forma de onda arbitrária) passa ainda por um transformador isolador que fica entre a saída do inversor e o *core tester*. Este transformador tem o objetivo de retirar possíveis níveis de tensão contínua na saída do inversor que não foram corrigidos pelo controle, bem como possibilitar o aumento da amplitude da tensão a ser aplicada no *core tester*.

Esta etapa funcional da bancada está representada na Figura 3.3.

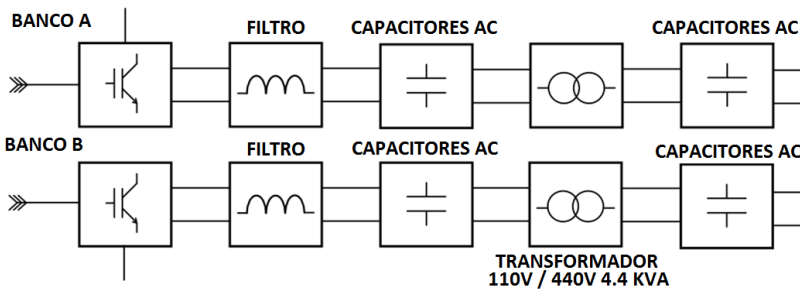


Figura 3.3 : Bloco funcional III.

3.4 BLOCO FUNCIONAL IV: AQUISIÇÃO, SINAIS E CONTROLE

A malha de controle utilizada na bancada foi implementada através de eletrônica analógica, e é do tipo não linear, mais especificamente sendo um controle por modo deslizante. O projeto da malha foi baseado em Batistela [16]. A malha é composta por um controlador PD e um controlador PI. Sua principal função é garantir que a indução magnética (ou a tensão induzida no sensor de fluxo) no núcleo seja senoidal e esteja em fase com a referência.

A malha de controle recebe o sinal da forma de onda vindo de sensores no *core tester* e o compara com o sinal da forma de onda da

referência gerada externamente via *LabVIEW*[17]. A forma de onda do erro passa pelos compensadores PD e PI, onde os dois sinais resultantes são somados com a referência. No fim do processo, o sinal resultante é comparado com uma onda triangular onde é gerado o trem de pulsos PWM de acionamento dos interruptores de potência do inversor. O trem de pulsos aciona os interruptores do inversor por meio de uma placa SKHI 23 da *Semikron*.

Os sinais provenientes do *core tester* são captados por meio de placas compostas por um atenuador resistivo, um seguidor de tensão e um filtro passa-baixa para remoção de ruídos. O divisor resistivo, como mostra a Figura 3.4, é quem determina o valor da atenuação.

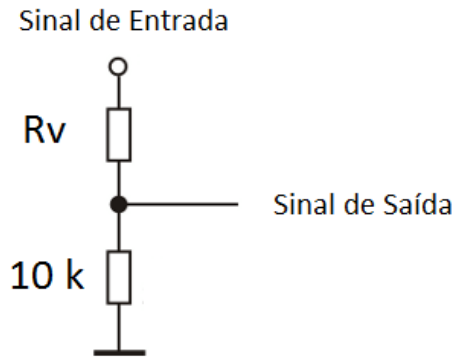


Figura 3.4: Divisor resistivo utilizado nas placas de aquisição.

A atenuação é necessária para manter o nível do sinal dentro dos limites de trabalho do circuito de controle. A placa é composta por um resistor fixo de 10 k Ω , e outros nove resistores que, conforme seu chaveamento, formam R_v e determinam o valor da atenuação. É necessário aplicar a atenuação adequada conforme o nível de tensão com o qual se alimenta o primário do *core tester*. Podem ser escolhidos 10 níveis que vão do unitário até a atenuação máxima de 19 vezes o sinal de entrada. A Tabela 3.1 apresenta os valores possíveis para R_v , seus respectivos ganhos e o valor de atenuação total do sinal levando em consideração a relação de espiras do *core tester*. Estes níveis também determinam os ganhos de tensão (G_{v_x} e G_{v_y}) utilizados nos

programas de tratamento matemático dos sinais, que serão abordados mais adiante.

Tabela 3.1: Valores de atenuação da placa de aquisição e do conjunto placa/core tester.

Rv	Atenuação	Atenuação Total
-	1,0	5,90
10 k	2,0	11,80
22 k	3,2	18,88
33 k	4,3	25,37
47 k	5,7	33,63
56 k	6,6	38,94
82 k	9,2	54,28
100 k	11,0	64,90
150 k	16,0	94,40
180 k	19,0	112,10

3.5 INSTRUMENTOS VIRTUAIS

Em conjunto com o desenvolvimento da bancada foram desenvolvidos *softwares* (Instrumentos Virtuais – Virtual Instruments – VIs) com o *LabView*[®] para possibilitar seu funcionamento e para tratar matematicamente o resultados obtidos. Dessa forma tem-se um VI desenvolvido para gerar as formas de onda de referência para o circuito eletrônico de controle. O *software* possui um painel onde o operador pode escolher a frequência e a amplitude de cada senóide, além da defasagem entre as duas. Os sinais são disponibilizados através de uma placa especial, instalada no computador onde o *software* está sendo executado, por meio de dois canais analógicos. Estes canais são ligados diretamente nas placas de controle fornecendo os sinais de referência para a bancada experimental. O valor máximo das senóides

não deve ultrapassar os 5,0 V de pico a fim de não comprometer o funcionamento do sistema de controle.

Outros dois VIs foram desenvolvidos com o intuito de, a partir das formas de onda de corrente de excitação e de tensão induzida nos enrolamentos dos sensores de cada eixo, calcular e apresentar gráficos referentes às grandezas pertinentes aos ensaios e à análise do desempenho da amostra.

Um dos VIs monta, a partir dos resultados obtidos com o tratamento matemático dos dados recebidos, uma série de gráficos representando cada grandeza medida durante os ensaios. Estes gráficos são importantes, pois facilitam a visualização dos resultados e possibilitam, por simples comparação, a identificação de certos efeitos que serão vistas mais adiante.

O outro VI, com uma interface mais simples, recebe os dados, efetua o tratamento matemático dos mesmos e monta uma planilha com os resultados totais de perdas, indução magnética e campo magnético de cada ensaio. Estas planilhas foram utilizadas na montagem dos gráficos de perdas magnéticas utilizados na comparação dos materiais.

Os programas possuem rotinas de entrada de parâmetros que recebem os dados físicos do conjunto estator/*core tester* e as informações operacionais do ensaio conforme Tabela 3.2.

Os ganhos de tensão, G_{Vx} e G_{Vy} , são determinados pelo divisor resistivo da placa de aquisição de sinais, como já foi visto anteriormente. Os ganhos de corrente, G_{Ix} e G_{Iy} , são determinados pelos amplificadores das sondas de leitura de corrente. Nos ensaios utilizou-se duas sondas cujos amplificadores, para uma escala de 1A, forneciam sinais de 1A/V e 1A/10mV. Neste caso os valores de ganho de corrente que devem ser colocados no VI são de 1 e de 100 para cada sonda, respectivamente.

Os programas recebem os dados do ensaio via arquivos gerados através de um osciloscópio digital no formato *CSV (comma separated value)* e então, multiplicados pelos ganhos pré-determinados, obtendo-se as seguintes formas de onda em função do tempo: tensão induzida no eixo X - V_x , tensão induzida no eixo Y - V_y , corrente de excitação do eixo X - I_x e corrente de excitação do eixo Y - I_y .

Tabela 3.2: Dados de entrada dos VI de tratamento matemático.

Massa do Estator (kg)	m
Espiras Primário (core-tester)	N_p
Espiras Secundário (core-tester)	N_s
Caminho Médio Magnético	l_m
Sessão Magnética	s
Frequência do Ensaio (Hz)	f
Período de Amostragem	n
Ganhos de Tensão (eixo X e Y)	$G_{vx} - G_{vy}$
Ganhos de Corrente (eixo X e Y)	$G_{ix} - G_{iy}$

As formas de onda resultantes são utilizadas nos cálculos das seguintes grandezas segundo cada eixo: indução magnética, calculadas por meio de (3.2) e (3.4) e campo magnético, calculadas por meio de (3.1) e (3.3).

$$H_x(t) = \frac{N_p}{l_m} I_x(t) \text{ [A/m]} \quad (3.1)$$

$$B_x(t) = \frac{1}{N_s S} \int V_x(t) \text{ [T]} \quad (3.2)$$

$$H_y(t) = \frac{N_p}{l_m} I_y(t) \text{ [A/m]} \quad (3.3)$$

$$B_y(t) = \frac{1}{N_s S} \int V_y(t) \text{ [T]} \quad (3.4)$$

Com estes dados, além das evoluções das formas de onda das tensões, correntes, campos e induções magnéticas, o VI desenvolvido

monta vários tipos de gráficos para auxiliar a análise dos resultados, tais como o lócus $B(H)$ de cada eixo, lócus $B_x(B_y)$, lócus $I_x(I_y)$, entre outros. Estes gráficos também são importantes na avaliação do andamento do ensaio em si, mostrando se houve algum tipo de problema e/ou se as grandezas estão dentro do esperado.

Dentro dos objetivos do ensaio, procurou-se conhecer a indução magnética máxima, calculada por meio de (3.5), e as perdas magnéticas. As perdas magnéticas para um período da forma de onda de referência são calculadas por meio de (3.6) e (3.7) para cada eixo, onde $B_{x_{MAX}}$ e $B_{y_{MAX}}$ são as induções magnéticas máximas de cada eixo e P_x e P_y são as parcelas de perdas magnéticas correspondentes a cada eixo. A perda magnética total é a soma dessas duas parcelas, dada por (3.8). Note que as características magnéticas do *core tester* estão incluídas nos resultados de ensaio.

$$B_{MAX} = \sqrt{B_{x_{MAX}}^2 + B_{y_{MAX}}^2} \quad [\text{T}] \quad (3.5)$$

$$P_x = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} V_{x_i} \cdot I_{x_i} \right) / m \quad [\text{W/kg}] \quad (3.6)$$

$$P_y = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} V_{y_i} \cdot I_{y_i} \right) / m \quad [\text{W/kg}] \quad (3.7)$$

$$P = P_x + P_y \quad [\text{W/kg}] \quad (3.8)$$

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O valor do caminho médio magnético do conjunto estator/*core tester* foi calculado por aproximação, tomando como base as dimensões dos estatores ensaiados e do núcleo do *core tester*. O valor obtido foi dividido por dois devido à existência de dois caminhos paralelos. Da mesma forma calculou-se a sessão magnética transversal referente a um dos eixos do *core tester*. Ambos os eixos possuem praticamente as mesmas características construtivas sendo calculado com base nas dimensões do núcleo do *core tester*.

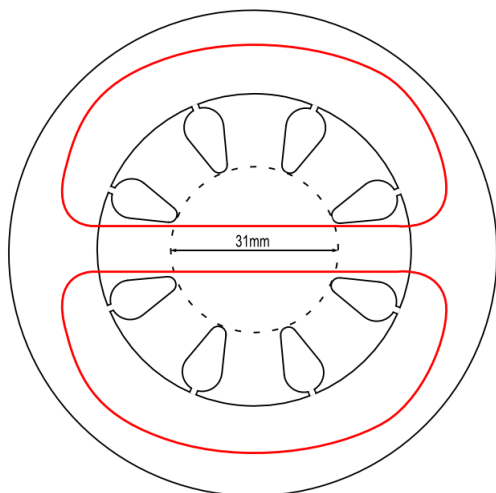


Figura 3.5: Caminho médio magnético do conjunto estator/core tester.

A tabela a seguir apresenta os dados construtivos do *core tester* e dos valores mantidos como referência para os ensaios e utilizados nos instrumentos virtuais desenvolvidos.

Tabela 3.3: Dados construtivos do *core tester* utilizados nos cálculos.

Espiras do Primário	N_p	118 espiras
Espiras do Secundário	N_s	20 espiras
Caminho Médio Magnético	l_m	57,2 mm
Altura	h	55,0 mm
Diâmetro Central	D_c	31,0 mm
Área Central	S	1700 mm ²

4 TESTES INICIAS

Com a bancada experimental montada, foram testados separadamente cada bloco que a compõem, antes de juntá-los, para se naveriguar o desempenho individual e se certificar do funcionamento de cada um. Após este procedimento, foram feitos os ajustes necessários para a operação da bancada com o intuito de atender os objetivos do projeto. A Figura 4.1 mostra a bancada desenvolvida. As formas de onda de tensão e corrente são adquiridas por meio de um osciloscópio de quatro canais e enviadas via USB para o VI de tratamento de dados. Dois canais do osciloscópio são referentes às tensões induzidas de cada eixo e os outros dois referentes às correntes de excitação. As formas de onda das correntes de excitação são medidas por sondas de efeito *Hall* associadas aos amplificadores da marca *Tektronix*. Conforme a escala de medição dos amplificadores é que são determinados os valores de ganho de corrente (G_{ix} e G_{iy}) usados no *software* de tratamento.



Figura 4.1: Bancada Experimental.

4.1 IMPOSIÇÃO DE CAMPO GIRANTE

Nos primeiros testes, cada eixo da bancada experimental foi alimentado separadamente com uma senóide de 60 Hz e 2,00 V de pico aplicada à referência. Com o auxílio do osciloscópio obteve-se as formas de onda de corrente do primário e de tensão medida na entrada do circuito de controle, logo após passar pela placa de aquisição.

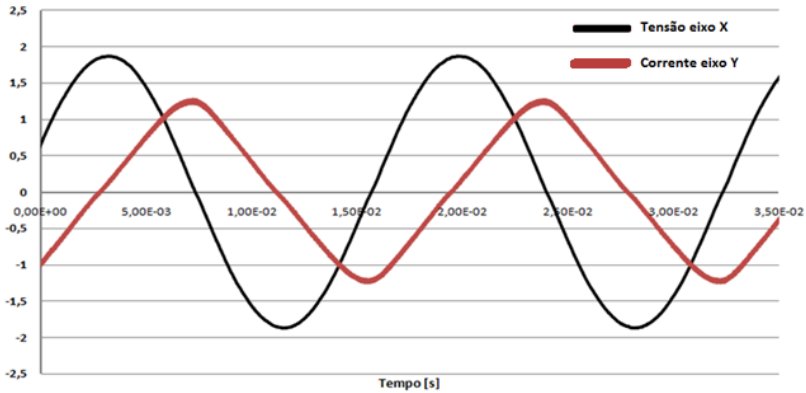


Figura 4.2 - Formas de onda de tensão (preto) e de corrente (vermelho) relativas ao eixo X.

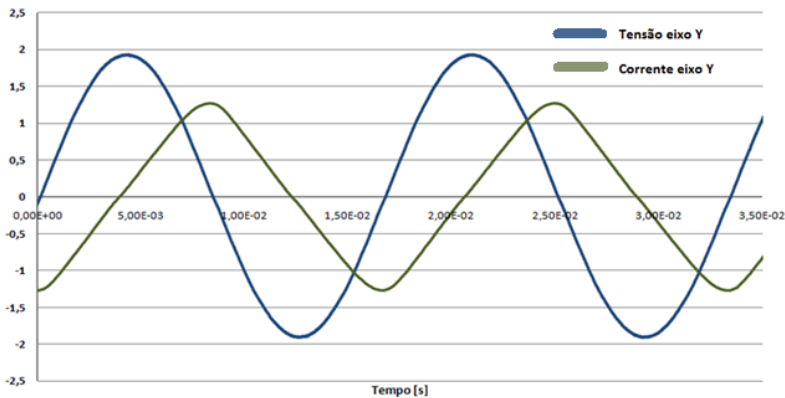


Figura 4.3 - Formas de onda de tensão (azul) e de corrente (verde) relativas ao eixo Y.

Na Figura 4.2 estão apresentadas as formas de onda de tensão em preto e de corrente em vermelho relativas ao eixo X da bancada. Para o outro eixo, o mesmo ensaio foi realizado e mostrado na Figura 4.3, onde a forma de onda de tensão está na cor azul e a de corrente na cor verde.

A Figura 4.4 mostra as formas de onda de tensão e corrente quando ambos os eixos estão em funcionamento. Com este resultado, mostra-se que a bancada está impondo um campo girante com sua amplitude e velocidade de giro controlados.

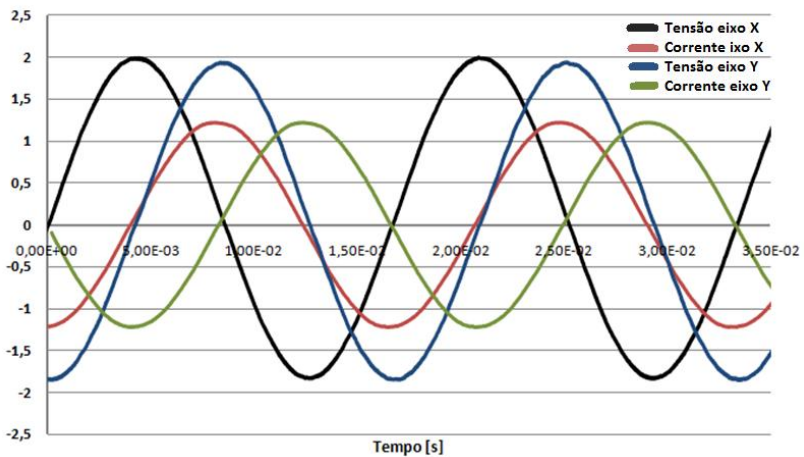


Figura 4.4 - Formas de onda de tensão e de corrente com operação sob campo girante.

Nas figuras a seguir se pode ver as formas de onda de tensão, Figura 4.5, e de corrente, Figura 4.6, de um ensaio com o valor máximo de tensão de referência (3,00 V de pico). Devido aos ganhos relacionados com a relação de transformação do *core tester* e da atenuação de tensão escolhida no circuito de leitura do sinal do secundário, o valor aplicado no primário do conjunto estator/*core tester* chega a quase 100 V de pico.

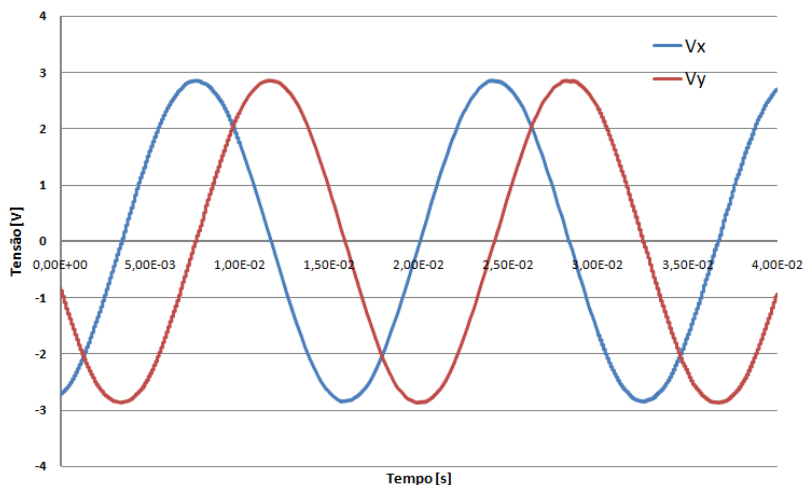


Figura 4.5 - Formas de onda de tensão aplicadas ao *core tester* durante ensaio.

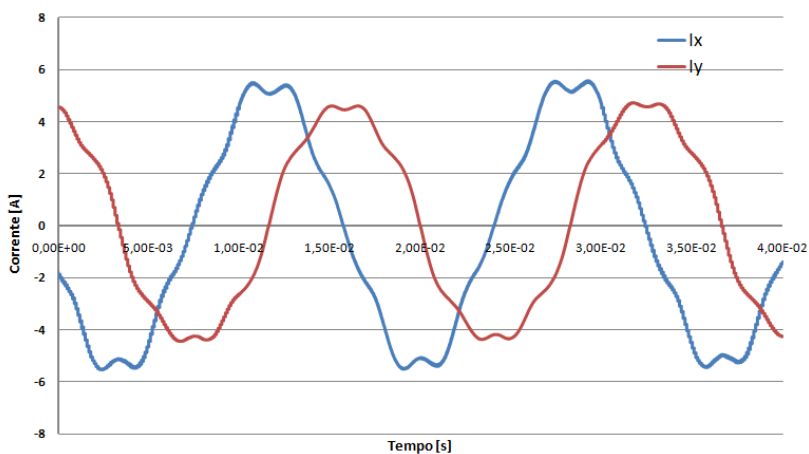


Figura 4.6 - Formas de onda de corrente aplicadas ao *core tester* durante ensaio.

A Figura 4.6 mostra que as formas de onda de corrente de cada eixo apresentam deformações, provavelmente devido ao material estar submetido a uma alta indução magnética, contemplando fenômenos de anisotropia magnética.

4.2 REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS

A fim de verificar o desempenho e a confiabilidade da bancada experimental, efetuou-se um teste de repetibilidade dos resultados de perdas medidas. Uma mesma amostra de um determinado material foi ensaiada cinco vezes consecutivas (ensaios denominados de E01 a E05), sendo que o estator foi apenas desparafusado do cabeçote, retirado momentaneamente e recolocado para novo ensaio.

Os resultados obtidos são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 4.1: Resultado de perdas para uma mesma amostra.

B (T)	E01 (W/kg)	E02 (W/kg)	E03 (W/kg)	E04 (W/kg)	E05 (W/kg)
1,80	9,52	9,35	9,44	9,30	9,27
1,73	8,29	8,20	8,24	8,11	8,09
1,66	7,25	7,21	7,19	7,09	7,08
1,59	6,35	6,35	6,30	6,21	6,22
1,52	5,59	5,60	5,53	5,46	5,47
1,45	4,94	4,95	4,86	4,82	4,83
1,38	4,38	4,39	4,29	4,27	4,28
1,31	3,90	3,89	3,80	3,79	3,79
1,24	3,47	3,46	3,37	3,37	3,37
1,17	3,09	3,07	3,00	3,00	3,00
1,10	2,74	2,72	2,66	2,66	2,66
1,03	2,42	2,40	2,36	2,36	2,36
0,96	2,13	2,11	2,08	2,07	2,07
0,89	1,85	1,84	1,82	1,81	1,81
0,82	1,59	1,58	1,57	1,56	1,56
0,75	1,35	1,35	1,33	1,31	1,32

Os dados da tabela acima foram uniformizados tomando-se como referência os valores de indução magnética. Com a bancada experimental, através do VI desenvolvido, é possível apenas gerar um valor de tensão como referência para o controle. Não é possível gerar

diretamente valores de indução magnética como referência para, por exemplo, construir um gráfico padrão de perdas magnéticas totais por indução magnética. Sendo assim, com os resultados obtidos de cada amostra, foi gerado um gráfico individual de perdas totais do qual utilizamos uma linha de tendência dos dados para uniformizar os valores obtidos para todas as amostras, como apresentado na Figura 4.7. Com esta linha de tendência, pode se reunir todos os valores de perdas magnéticas referenciadas aos mesmos pontos de indução magnética e realizar uma média dos valores obtidos para chegar a um gráfico de perdas totais que melhor representa o desempenho do material.

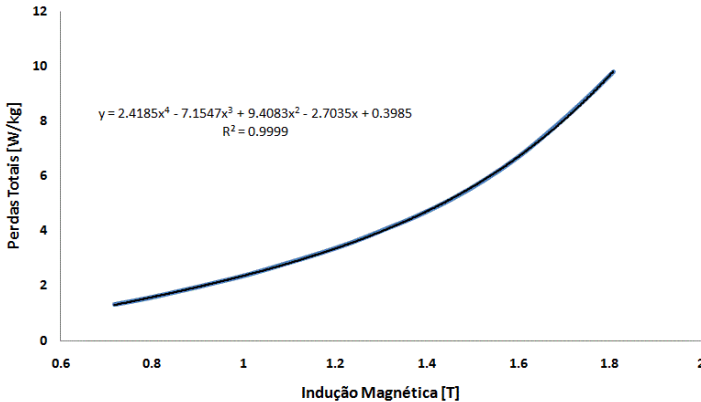


Figura 4.7: Obtenção da linha de tendência da perda magnética com os dados obtidos.

Na Tabela 4.2 pode-se ver o tratamento estatístico dos resultados. Além da média, obtida por (4.1), foram calculados o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados, conforme (4.2) e (4.3), respectivamente.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} * 100 \quad (4.3)$$

Os resultados apresentaram coeficientes de variação abaixo de 1,5 % nos ensaios. Isto demonstra a baixa dispersão dos resultados obtidos e confirma que o conjunto bancada/*core tester* possui uma boa precisão dos resultados, chegando a valores próximos aos encontrados em bancadas comerciais [6].

Tabela 4.2: Tratamento estatístico dos resultados obtidos.

B (T)	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
1,80	9,38	0,102	1,09
1,73	8,19	0,083	1,02
1,66	7,16	0,073	1,02
1,59	6,29	0,068	1,08
1,52	5,53	0,065	1,17
1,45	4,88	0,062	1,27
1,38	4,32	0,059	1,38
1,31	3,84	0,056	1,45
1,24	3,41	0,051	1,49
1,17	3,03	0,045	1,49
1,10	2,69	0,038	1,42
1,03	2,38	0,031	1,31
0,96	2,09	0,025	1,17
0,89	1,83	0,019	1,07
0,82	1,57	0,017	1,07
0,75	1,33	0,018	1,32

4.3 MEDIÇÃO DE CAMPOS NO ESTATOR

Durante os testes iniciais, foram enroladas bobinas para medição de campo em uma das amostras ensaiadas. Duas bobinas foram colocadas nos dentes e outras duas na coroa do estator. Cada par de bobinas contemplou um eixo, como mostra a Figura 4.8.

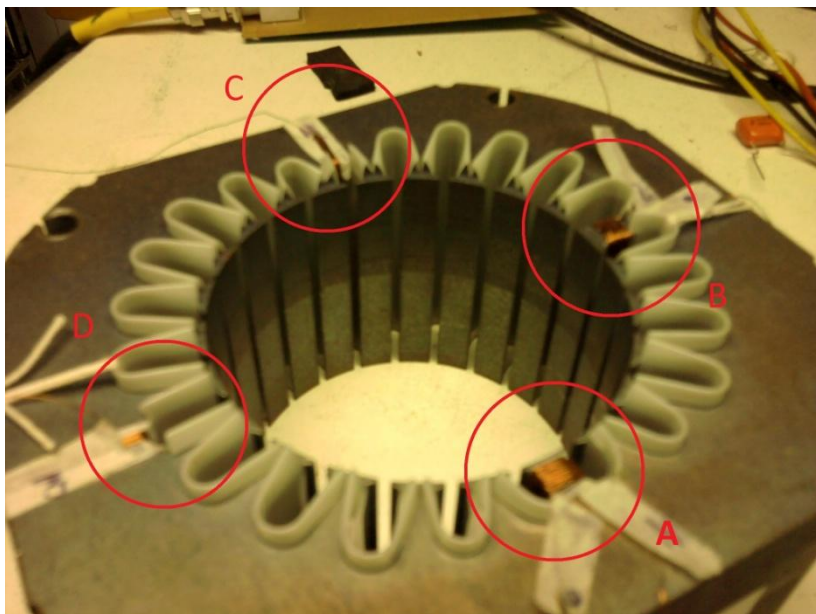


Figura 4.8: Detalhe das bobinas enroladas na coroa (C, D) e dentes (A, B) do estator.

Apesar dos sensores do núcleo do *core tester* fornecerem valores de indução que supostamente existem na amostra (estator), estas medições incluem a seção dos dentes do seu núcleo (a indução nos dentes) e a seção da coroa (a indução na coroa). Obteve-se com este ensaio então uma ideia do valor de indução máxima aos quais os dentes e a coroa são submetidos.

Na Tabela 4.3 podem-se ver os valores máximos de indução magnética encontrados para cada dente e coroa de um estator e o valor aproximado da indução magnética da amostra obtida pelo sensor no núcleo do *core tester*.

Tabela 4.3: Valores de indução magnética medidos nos dentes e na coroa do estator.

Vref (V)	Dente Bobina 01 (T)	Dente Bobina 2 (T)	Coroa Bobina 01 (T)	Coroa Bobina 02 (T)	Core-tester (T)
3,00	1,687	1,635	1,552	1,586	1,81
2,88	1,629	1,573	1,515	1,555	1,74
2,76	1,579	1,517	1,477	1,525	1,67
2,64	1,527	1,437	1,429	1,486	1,60
2,52	1,483	1,364	1,383	1,45	1,53
2,40	1,425	1,265	1,322	1,394	1,45
2,28	1,364	1,169	1,264	1,326	1,38
2,16	1,296	1,091	1,202	1,255	1,30
2,04	1,209	1,019	1,125	1,179	1,23
1,92	1,137	0,939	1,066	1,104	1,15
1,80	1,058	0,866	0,999	1,03	1,08
1,68	0,977	0,795	0,93	0,956	1,00
1,56	0,916	0,738	0,878	0,896	0,933
1,44	0,842	0,67	0,811	0,821	0,859
1,32	0,762	0,61	0,74	0,751	0,786
1,20	0,683	0,546	0,667	0,676	0,718

Na Figura 4.9 e na Figura 4.10 pode-se ver as formas de onda de indução magnética sob as quais os dentes e a coroa estão submetidos. Os valores apresentados referem-se ao nível máximo de indução magnética aplicada nos ensaios. Nota-se que a forma de indução nos dentes, mais do que na seção da coroa, apresenta uma distorção significativa, embora a forma de onda no sensor de indução no núcleo seja imposta na forma de onda senoidal. Isto provavelmente acarreta perdas devidas principalmente ao aumento das correntes

induzidas. Este fato pode ser ainda explorado em trabalhos futuros de continuidade desta pesquisa.

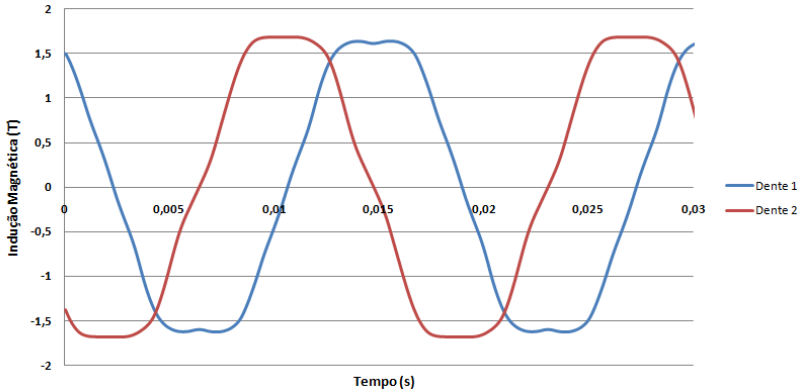


Figura 4.9: Formas de onda da indução magnética nos dentes do estator.

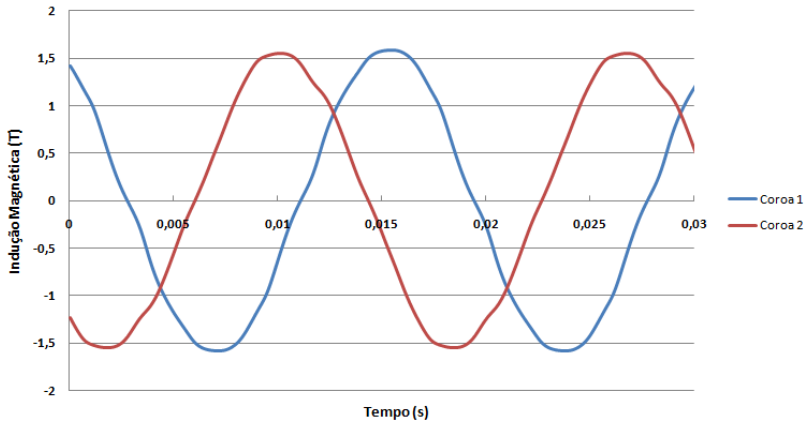


Figura 4.10: Formas de onda da indução magnética na coroa do estator.

4.4 IMPOSIÇÃO DE DEFEITOS NO ESTATOR

A utilização da bancada para a qualificação dos materiais utilizados na fabricação de estatores foi o principal trabalho realizado e seus resultados serão mostrados mais adiante. No entanto, um estudo

preliminar para evidenciar a aptidão da instrumentação para a análise de possíveis defeitos de fabricação em estatores também foi desenvolvido.

Foi utilizado um estator no qual foram enroladas bobinas em oito dos seus dentes, como mostra a Figura 4.11. Foram provocados curtos-circuitos intencionais nestas bobinas para averiguar a capacidade da bancada de aplicar um campo rotacional desejado e ver a possibilidade de utilização dos lócus $B(H)$ para detectar estes defeitos de grande significância física que foram, intencionalmente, colocados. Com este procedimento, pretende-se simular um possível defeito de fabricação em um determinado dente ou a presença de um curto entre espiras nas bobinas do estator, o que pode ocorrer devido ao procedimento mecânico de montagem do estator bobinado.

Foram realizados três ensaios: a) o primeiro com todas as bobinas em aberto (teste de referência), que será representado em todos os gráficos pela cor preta; b) o segundo ensaio contendo um curto-circuito na bobina 5, representado nos gráficos pela cor vermelha; c) e o terceiro ensaio, contendo um curto-circuito na bobina 3, representado pela cor azul. O curto-circuito da bobina 3 é perpendicular ao fluxo gerado pela bobina de excitação no eixo Y e o curto-circuito na bobina 5 é perpendicular ao fluxo gerado pela bobina de excitação do eixo X. Os resultados são apresentados a seguir, sendo comparados com o caso sem a presença de curtos-circuitos.

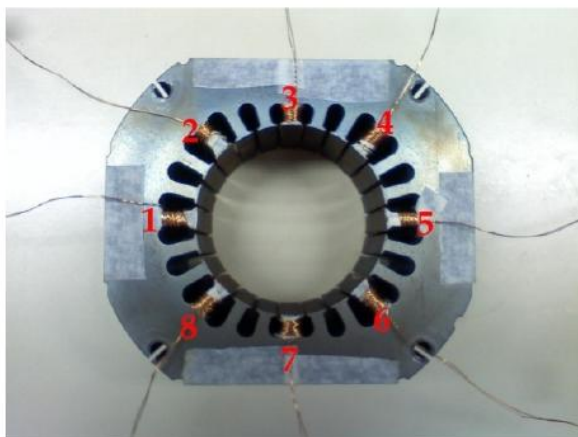


Figura 4.11 - Estator utilizado nos testes de curto-circuito.

A Figura 4.12 mostra as formas de onda da tensão medidas nos enrolamentos sensores (secundários) relativas a cada eixo para os três casos. Nota-se visualmente que elas possuem um formato senoidal e todas estão sobre o mesmo traçado. Isto demonstra a capacidade da bancada em impor a forma de onda das tensões induzidas em cada um dos eixos e que o sistema acondiciona devidamente os testes, mesmo havendo alterações consideráveis na parte eletromagnética devido à existência de curtos-circuitos.

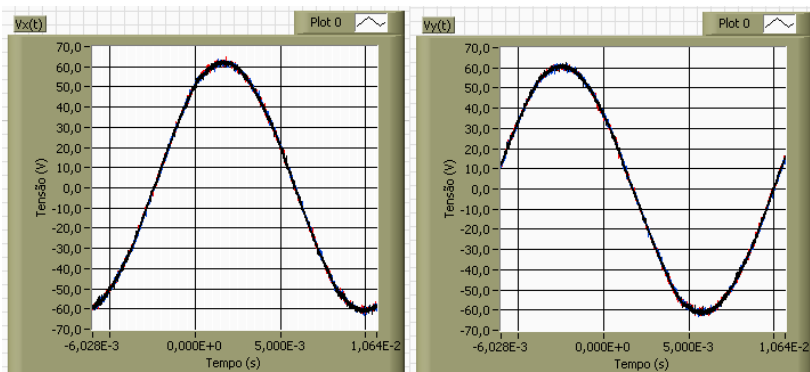


Figura 4.12 – Formas de onda de tensões induzidas no eixo X e de tensões induzidas no eixo Y.

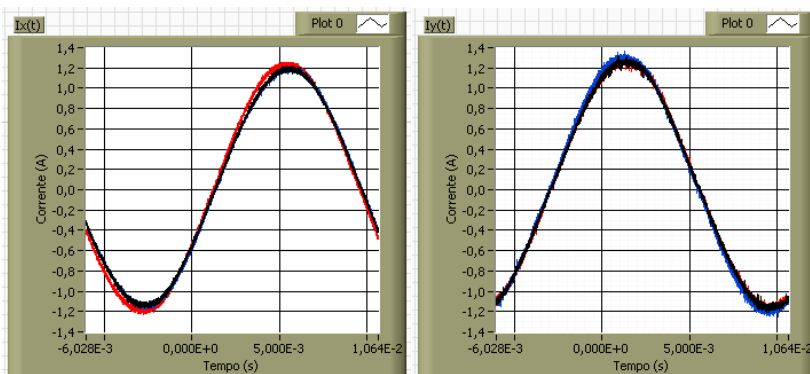


Figura 4.13 - Correntes de excitação no eixo X e correntes de excitação no eixo Y.

A Figura 4.13 mostra as formas de onda das correntes de excitação para cada eixo, comparando-as com cada caso ensaiado. Quando o curto-circuito afeta o fluxo produzido pela bobina de excitação do eixo X, a forma de onda da corrente passa a ter uma trajetória distinta das formas de onda da corrente do estator sem defeito ou do estator com defeito para o eixo Y. Já quando o curto circuito é relativo ao eixo Y, a corrente no eixo Y é distinta das demais. Isto demonstra também que é possível detectar problemas relativos a cada eixo.

Na Figura 4.14 nota-se, em detalhe, o incremento na corrente no eixo X causado pelo curto-circuito na bobina 5 e que a corrente no eixo Y não é afetada.

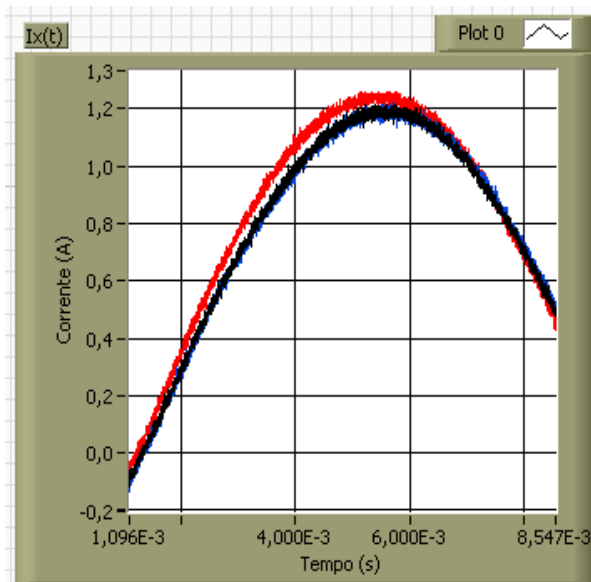


Figura 4.14 - Detalhe da forma de onda das correntes de excitação. Na cor vermelha quando há um curto-circuito na bobina 5.

A Figura 4.15 mostra as grandezas eletromagnéticas: indução e campo magnéticos para cada um dos eixos calculados pelo instrumento virtual. Estas formas de onda contêm as aproximações relativas ao caminho magnético e à secção magnética.

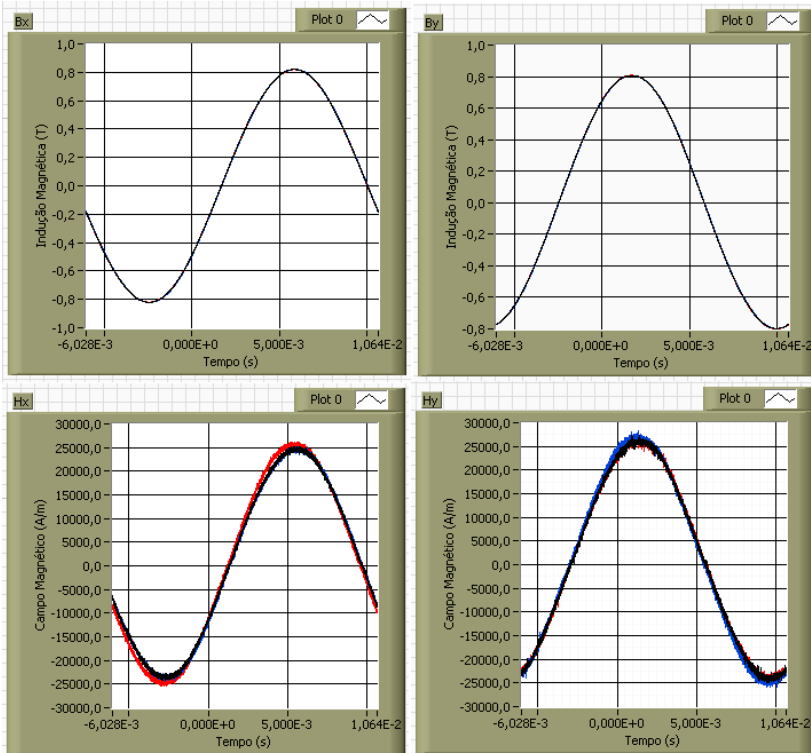


Figura 4.15 - Induções magnéticas no eixo X, induções magnéticas no eixo Y, campos magnéticos no eixo X e campos magnéticos no eixo Y.

Como o campo magnético é uma imagem da corrente [1], pode-se ver que as diferenças entre os ensaios de testes de curto também aparecem nas formas de onda desta grandeza. As figuras a seguir mostram gráficos (com representações diferentes) das correntes e tensões relativas aos três ensaios. A Figura 4.16 mostra o lócus das tensões induzidas (que é uma grandeza mais sensível do que a indução magnética, pois é proporcional à derivada temporal da indução [1]) e das induções magnéticas dos três casos, onde a trajetória é mantida pelo controle na forma circular. Como as formas de onda das tensões induzidas são impostas, no gráfico das tensões não aparece nenhuma diferença entre os ensaios contendo ou não curtos-circuitos.

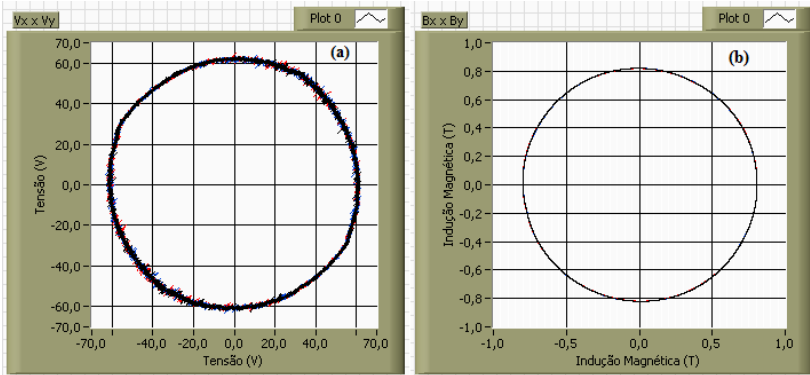


Figura 4.16 - Lócus X(Y) das tensões induzidas(a) e induções magnéticas (b) relativas aos três casos testados.

A Figura 4.17 mostra o lócus das correntes para os três casos ensaiados. Nota-se que quando não há defeito, a trajetória neste lócus é praticamente circular neste ponto de indução (não há saturação). Quando há um defeito, o incremento acontece simetricamente e de acordo com a localização da bobina de curto-circuito. Mostra-se também que não é necessário levar o estator à saturação para que defeitos possam ser notados.

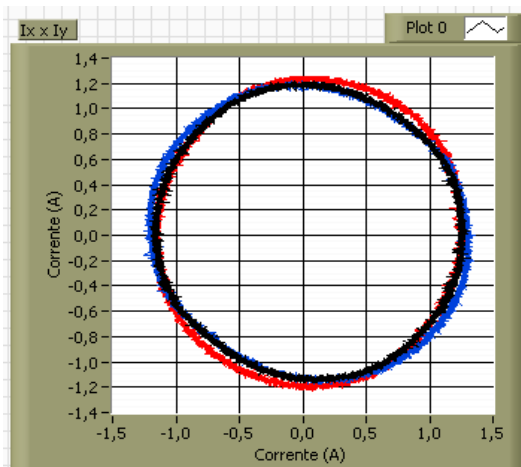


Figura 4.17 - Lócus X(Y) das correntes de excitação relativas aos três casos testados.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos durante os testes iniciais demonstraram a capacidade da bancada experimental desenvolvida em criar e manter campos rotacionais seguindo um valor de referência.

O levantamento estatístico dos dados mostrou que a bancada experimental possui um bom índice de repetibilidade dos resultados, apresentando coeficientes de desvio não superiores a 1,5% no caso estudado. Este resultado é muito importante, pois se trata da confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios.

Por fim, ensaios com um estator dotado de espiras em curto-circuito mostraram ser possível a identificação de falhas na montagem de pacotes de estatores. Este assunto foi abordado superficialmente neste trabalho, apenas para mostrar possíveis capacidades da bancada, e merece atenção caso esta linha de pesquisa seja conduzida adiante em pesquisas futuras.

5 ESTUDO E ANÁLISE DE AÇOS UTILIZADOS EM ESTADORES

Durante o decorrer deste trabalho, a EMBRACO forneceu amostras de três tipos de materiais utilizados na confecção de estadores. Uma parte delas foi disponibilizada na forma de chapas retangulares, de tamanhos padronizados para ensaios no quadro de Epstein, e a outra parte foi estampada e montada na forma de estadores, os quais foram ensaiados com o *ring coil* e com a nova bancada experimental desenvolvida.

Num primeiro momento, o objetivo do trabalho foi comparar os resultados obtidos no ensaio padrão (Epstein), no *ring coil* (ensaio de uma bancada comercial) e na bancada experimental. Por ser um teste simples, rápido e que possui normas, o quadro de Epstein é considerado como padrão também sob os aspectos comercial e de aplicação relativos à caracterização de materiais magnéticos. Porém, este teste utiliza amostras na forma de tiras retangulares e não contempla o comportamento real do fluxo em estadores. Já o *ring coil*, apesar de utilizar a mesma metodologia do quadro de Epstein, é capaz de ensaiar amostras de formato toroidal, semelhantes a um estator. Porém este teste contempla apenas a área da coroa, deixando a região correspondente aos dentes do estator sem fluxo magnético, e com a magnetização do material praticamente só nas direções tangenciais ao raio da coroa. Isto gera dúvidas a cerca dos valores medidos de perdas obtidos neste método. Além disso, há imprecisões inerentes ao ensaio, fazendo com que se impossibilitem comparações diretas com os resultados obtidos com o quadro de Epstein. Como este grau de incerteza é o mesmo para todas as amostras, é possível realizar comparações qualitativas dos resultados obtidos em cada teste de cada amostra, levantando o desempenho geral de cada material de maneira relativa.

A nova bancada experimental, assim como o *ring coil*, utilizará estadores já montados durante os ensaios, porém poderá aplicar campos rotacionais na amostra, fazendo com que circule fluxo por todo o estator, inclusive nos dentes. Novamente, os resultados obtidos com a bancada experimental não podem ser comparados diretamente com os resultados dos ensaios anteriores, principalmente porque o material que compõem o núcleo do *core tester* é magnético e influi nos valores

medidos. Porém, poderemos utilizar os resultados qualitativamente em procedimentos de comparação da eficiência de cada material.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos três tipos de ensaios além das comparações realizadas a fim de verificar a existência ou não de uma conformidade entre os dados obtidos. As características e a nomenclatura de cada amostra ensaiada no quadro de Epstein são apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 5.1: Características das lâminas ensaiadas com o quadro de Epstein.

Amostra	Material	Dimensões da Chapa			
		Comprimento	Largura	Espessura	Massa
1ª	M1	280 mm	30 mm	500 μm	518 g
2ª	M2	305 mm	30 mm	500 μm	696 g
3ª	M3a	280 mm	30 mm	500 μm	642 g
4ª	M3b	280 mm	30 mm	500 μm	642 g

No ensaio no quadro de Epstein, as três primeiras amostras foram ensaiadas com lâminas cortadas 50% no sentido longitudinal e 50% no sentido transversal à laminação, conforme a norma. A quarta amostra foi ensaiada com lâminas cortadas 50% no sentido longitudinal e 50% no sentido diagonal à laminação. A primeira amostra foi ensaiada com 16 lâminas e as demais amostras foram ensaiadas com 20 lâminas. Pela norma NBR 5161 [7], são necessárias no mínimo 12 lâminas. Assim, a quantidade de lâminas utilizadas nos ensaios está também de acordo com a norma.

Serão apresentados os resultados dos valores das perdas magnéticas totais e relativas, em [W/kg], em função da indução magnética. Os resultados serão apresentados na forma de gráficos para melhor visualização e comparação das amostras.

5.1 ENSAIOS COM O QUADRO DE EPSTEIN

Os resultados de medição e caracterização dos aços elétricos através do quadro de Epstein são mostrados a seguir. Os dados são referentes a testes em 60 Hz onde se variou a indução magnética de 50 mT à 1800 mT para cada uma das amostras.

A Figura 5.1 mostra as perdas magnéticas totais para as quatro amostras. Por este gráfico, nota-se que até aproximadamente 1500 mT os materiais M1 e M2 apresentam resultados muito próximos, vindo a se destacar o material M2 com menores perdas para valores de indução mais elevados. O material M3, em ambas as amostras, apresentou os maiores valores de perdas para quase toda a faixa de indução magnética.

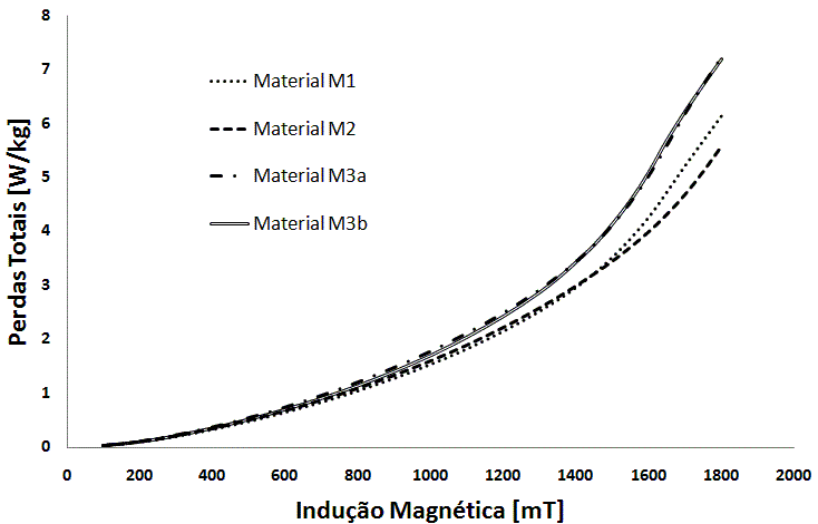


Figura 5.1 - Valores de perdas totais obtidos nos ensaios com o quadro de Epstein.

A Figura 5.5 apresenta o gráfico em valores percentuais de perdas tomando como referência os resultados obtidos com o material M2. Os valores percentuais utilizados são dados por (5.1) onde x_{ref} são os valores obtidos com o material M2 e x_m os valores obtidos com os demais materiais.

$$\Delta\% = \frac{x_m - x_{ref}}{x_{ref}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.1)$$

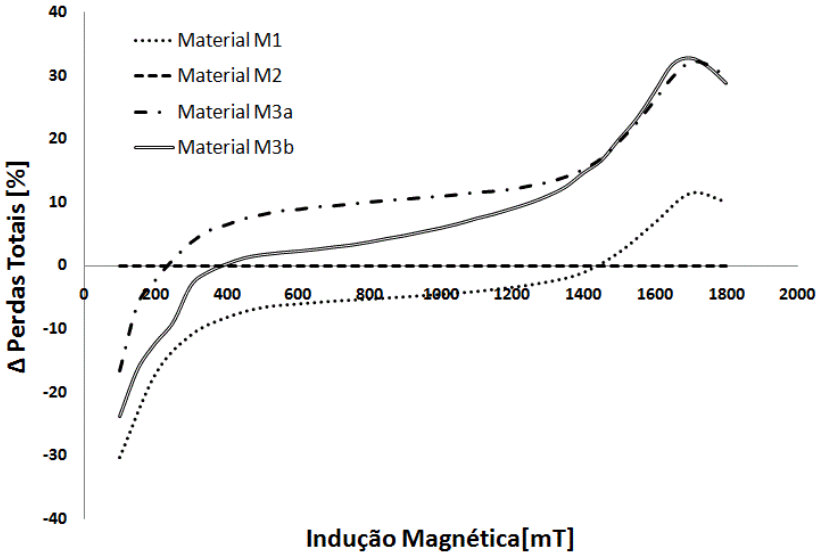


Figura 5.2 - Valores percentuais de perdas totais relativas ao material M2.

A Figura 5.2 facilita a visualização dos resultados obtidos para as quatro amostras. Analisando os resultados dos ensaios com o quadro de Epstein, os materiais M1 e M2 se destacam em qualidade em relação aos demais nos ensaios no que diz respeito às perdas. O M3a e o M3b não apresentaram bons resultados em comparação com os M1 e o M2. Numa comparação entre as duas amostras, o M3b apresentou melhores resultados do que o M3a. Geralmente, este não é o comportamento esperado para os aços GNO.

5.2 ENSAIOS COM O RING COIL

Os resultados dos ensaios apresentados a seguir foram realizados na bancada *Brockhauss Messtechnik* [6], utilizando a metodologia chamada *ring coil*. Os estadores foram montados, pela empresa EMBRACO, com os mesmos aços ensaiados no quadro de Epstein. A Figura 5.3 mostra um pacote do estator sendo testado. As características e a nomenclatura de cada amostra ensaiada são apresentadas na Tabela 5.2. Os materiais M1, M2 e M3 correspondem aos mesmos utilizados no quadro de Epstein.

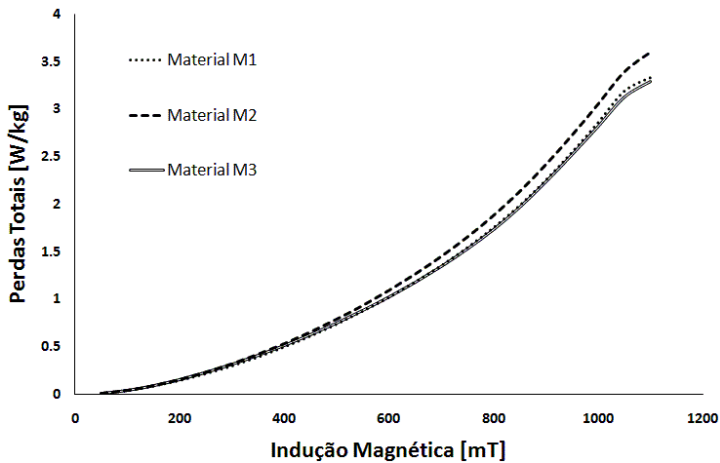


Figura 5.3 - Estator sob teste.

Os resultados mostrados a seguir apresentam comparações entre os estadores feitos com os três materiais. A Figura 5.4 e a Figura 5.5 mostram comparações das perdas magnéticas totais e percentuais referentes ao material M2, respectivamente. Estadores feitos com material M2 apresentam perdas maiores do que para os montados com os outros materiais. Tomou-se o M2 como referência, assim como foi realizado na comparação utilizando o método de caracterização pelo quadro de Epstein. As diferenças se tornaram facilmente visíveis, facilitando as comparações dos resultados.

Tabela 5.2: Características dos estadores ensaiados com o *ring coil*.

Amostra	Material	Dimensões dos Estadores			
		Diâmetro Externo	Diâmetro Interno	Empilhamento	Massa
1 ^a	M1	280 mm	30 mm	500 μ m	518 g
2 ^a	M2	305 mm	30 mm	500 μ m	696 g
3 ^a	M3	280 mm	30 mm	500 μ m	642 g

**Figura 5.4 - Valores de perdas totais obtidos no ensaio com o *ring coil*.**

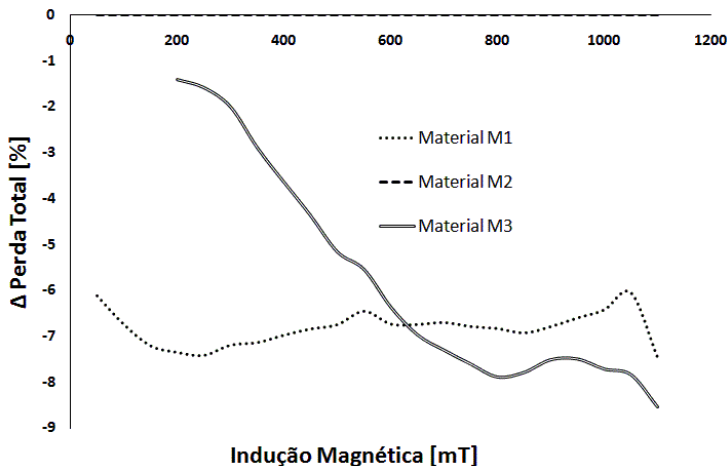


Figura 5.5 - Valores percentuais de perdas totais relativas ao material M2.

Entre os três materiais, o material M3 apresentou os valores mais baixos de perdas, para induções acima de 650 mT. O material M1 também apresentou bons resultados de uma forma geral, inclusive sob baixas induções.

Com os resultados obtidos nos ensaios dos estadores através do método *ring coil*, de uma maneira geral, o M3 foi o que apresentou os melhores resultados, levando-se em consideração que uma máquina opera sob os maiores valores de indução.

5.3 ENSAIOS COM A BANCADA EXPERIMENTAL

O objetivo principal dos ensaios realizados com a bancada experimental foi levantar as perdas totais de cada material e realizar uma comparação qualitativa dos valores obtidos. Para isso foram ensaiados 10 estadores de cada material sendo um total de 30 estadores ensaiados. A Figura 5.6 ilustra uma das amostras sendo ensaiada.



Figura 5.6 - Amostra de um dos materiais durante o ensaio.

Foram geradas senóides de referência de 60 Hz, partindo-se de 3,00 V de pico até 1,20 V de pico, sempre decrescendo em passos de 120 mV, totalizando 16 ensaios para cada amostra. As medidas foram feitas sempre se iniciando com os valores maiores de indução para evitar possíveis interferências de magnetização residual do material do núcleo.

Todas as amostras foram cuidadosamente manuseadas para evitar problemas como oxidação e deformação física dos estadores. Tomou-se o cuidado também de manter o mesmo aperto dos parafusos de fixação para todas as amostras. O valor de torque nos parafusos de 50 kgf.cm foi escolhido para evitar qualquer dano ao cabeçote do *core tester* por apertos exagerados, visto que este foi confeccionado em alumínio. Este cuidado também foi tomado para evitar que problemas, tais como perdas interlaminares, pudessem afetar os resultados dos ensaios [1].

Os resultados dos ensaios na bancada experimental podem ser vistos na Figura 5.7 e na Figura 5.8.

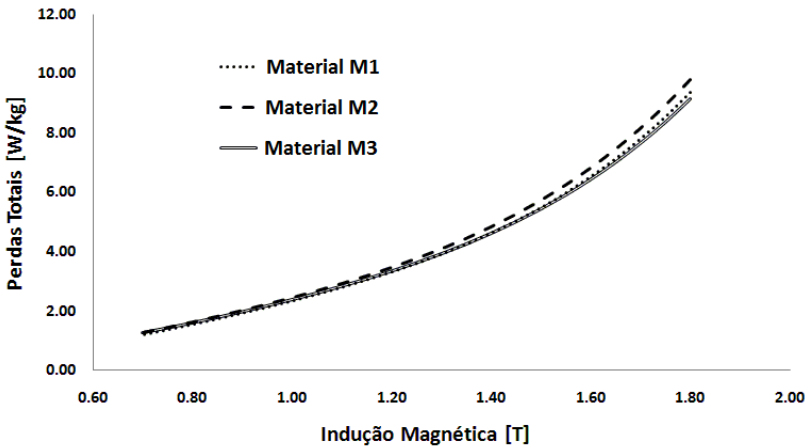


Figura 5.7 - Valores de perdas magnéticas totais dos três materiais ensaiados.

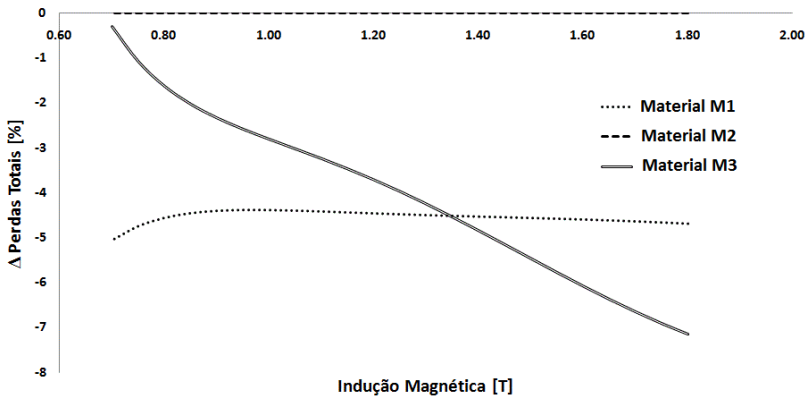


Figura 5.8 - Valores percentuais de perdas totais relativas ao material M2.

Nos gráficos das curvas apresentadas na Figura 5.8, pode-se ver que os resultados obtidos com a bancada experimental demonstraram uma tendência de perdas próxima dos resultados obtidos com o ensaio com o *ring coil*, porém apresentando uma melhor linearidade dos resultados.

Novamente os materiais M1 e M3 obtiveram melhores resultados do que o M2, contrariando os resultados obtidos no Quadro de Epstein para os mesmos materiais.

5.4 ENSAIOS COM O DINAMÔMETRO

Neste item serão apresentados os resultados de testes realizados em dinamômetro, por técnicos da Embraco, com motores produzidos com os três aços avaliados. Os estadores foram montados com os mesmos pacotes de lâminas testados com o *ring coil* e com a bancada experimental. Estes pacotes foram isolados e bobinados ao mesmo tempo, utilizando a mesma máquina de bobinagem. Desta forma, pode-se dizer que a única diferença entre os estadores é o aço utilizado na formação dos pacotes. Para o rotor, foi utilizada apenas uma peça padrão que foi confeccionada com aço M2.

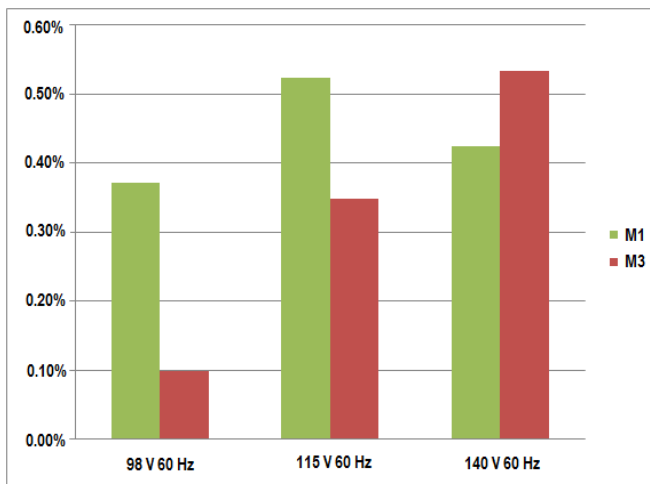


Figura 5.9 - Resultados de eficiência relativa obtidos com o dinamômetro. (tomando o material M2 como referência)

A principal característica utilizada na comparação dos motores foi a eficiência no torque nominal. Como o desempenho do aço depende do nível de indução, variou-se a tensão de alimentação do motor para obter diferentes níveis de indução. Em função de sua geometria, a indução não é homogênea ao longo da lâmina, sendo maior na região dos dentes do que na coroa.

A Figura 5.9 mostra os resultados obtidos com o dinamômetro, tomando novamente o material M2 como referência. Embora os valores obtidos sejam próximos, eles mostram uma tendência de desempenho similar aos dados obtidos com o *ring coil* e com a bancada experimental. Sob baixas induções, o material M1 obteve o melhor desempenho. Porém, com o aumento da indução, o material M3 passa a se destacar e mostra um melhor rendimento.

6 CONCLUSÃO

A análise dos resultados mostrou que os objetivos deste trabalho foram alcançados, ou seja, o conjunto bancada/*core tester* desempenhou corretamente sua função criando e mantendo um campo rotacional nas amostras, mesmo em condições de saturação. A bancada experimental se destaca em relação ao *ring coil*, pois além de realizar o mesmo tipo de ensaio contemplando todo o estator, pode revelar defeitos de construção. No entanto, o fato de ser um teste totalmente manual, tanto na operação do equipamento quanto no tratamento dos dados obtidos, configura uma desvantagem da bancada experimental em relação ao *ring coil* no que diz respeito à realização de testes rápidos.

Os resultados obtidos nos ensaios mostraram que apenas o teste padrão (quadro de Epstein) pode não ser suficiente para avaliar o rendimento de materiais utilizados na construção de pacotes de estatores. Na comparação dos resultados das três amostras de lâminas, levando em consideração os pontos com maiores valores de indução magnética, o quadro de Epstein aponta o material M2 como sendo o de melhor qualidade. O material M1 obteve resultados muito próximos aos do M2, apresentando perdas reduzidas sob valores de indução baixos. Porém, sob valores de indução altos, seu desempenho cai, justificando a escolha do material M2. Este teste indicou as amostras do material M3 como sendo o material de pior qualidade entre as amostras analisadas. Tomando-se como referência o material M2, o material M3 obteve valores de perdas até 35% maiores. Este resultado é o que mais chama a atenção, pois é exatamente este material que obteve o melhor desempenho nos demais ensaios. Tanto o *ring coil* e a bancada experimental, considerando as perdas no material, quanto o dinamômetro, que avalia o rendimento final do conjunto, apontaram o material M3 como sendo o de melhor qualidade, apresentando os menores valores de perdas e o melhor rendimento entre os três materiais.

Viu-se também que, apesar de o *ring coil* inserir erros de medição, devido ao formato das lâminas e de não contemplar a região dos dentes do estator, este tipo de teste apresentou uma tendência de resultados, sob o aspecto qualitativo do material, muito próximas aos encontrados com a bancada experimental, que contempla os dentes do

estator criando também um campo magnético rotacional. Pode-se dizer até que o *ring coil* pode servir como um teste alternativo ao quadro de Epstein quando há necessidade de ensaios de caracterização rápidos e qualitativos entre amostras de materiais na forma de estatores montados.

Num teste inicial com um estator propositalmente defeituoso, pôde-se comprovar a capacidade da bancada experimental em apontar a existência de anomalias durante os ensaios. Mostrou-se que, através dos gráficos de corrente disponibilizados pelo instrumento virtual desenvolvido, é possível visualizar alterações em suas formas de onda possibilitando até a localização da posição do defeito, visto que a presença do defeito afeta o eixo onde o mesmo ocorre. Os testes realizados revelaram uma nova possibilidade de uso para a bancada experimental. Com mais estudos é possível aprimorar a detecção destes defeitos, não só para o curto-circuito entre espiras de estatores já bobinados, mas também para detecção de curto-circuito entre lâminas.

Algumas possibilidades de melhoria da bancada experimental e de análise de resultados aparecem como proposta para trabalhos futuros. A automatização da bancada experimental, visando simplificar e agilizar os ensaios, isentando a necessidade da presença de operadores experientes durante os testes, seria uma possível continuidade deste trabalho. Outra proposta seria a de realizar a leitura dos sinais, tanto de tensão quanto de corrente, diretamente pelos VIs de tratamento matemático através de placas dedicadas de aquisição de sinais. Desta forma não seria necessária a utilização de um osciloscópio durante os ensaios e haveria a possibilidade de se trabalhar diretamente com valores de indução magnética no painel do VI, visto que os cálculos poderiam ser feitos em tempo real. Por fim, além do aprimoramento na identificação de defeitos construtivos nos pacotes de estatores, a modelagem e determinação das perdas do núcleo do *core tester*, o que possibilitaria o levantamento mais preciso das perdas nos pacotes de estatores com a bancada experimental.

7 BIBLIOGRAFIA

1. MEURER, E. J. **Estudo das Perdas Magnéticas Interlaminares em Máquinas Elétricas**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica).
2. BERTOTTI, G. **General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic**. EUA: IEEE Transactions on Magnetics, v. 24, 1988. 621-630 p.
3. BOGLIETTI, A. et al. **Predicting Iron Losses in Soft Magnetic Materials With Arbitrary Voltage Supply: An Engineering Approach**. EUA: IEEE Transactions on Magnetics, v. 39, 2003.
4. CULLITY, B. D. **Introduction to Magnetic Materials**. EUA: Addison-Wesley Publishing Company, 1972.
5. BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase Estática**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.
6. BROCKHAUS MEASUREMENTS. **Advanced Measuring Technologies**, 2010. Disponível em: <<http://www.brockhaus.net/e-index.html>>.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Produtos Laminados Planos de Aço para Fins Elétricos – verificação das propriedades, NBR 5161**, 1996.
8. SADOWSKI, N.; MAZENC, M. L. **Relatório Interno**. Florianópolis: UFSC, 2003.
9. PFÜTZNER, H. **Present Status of Research on Two-Dimensional Magnetization**. In: SEVENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON 1&2 DIMENSIONAL MAGNETIC MEASUREMENT AND TESTING. Lüdenscheid: Alemanha, 2002. 81-87 p.
10. IAMAMURA, B. A. T. **Desenvolvimento de um Dispositivo Magnético para Teste de Estatores**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica).
11. HBM MEASUREMENT. **Transducer, Load Cell, Data Acquisition System**, 2011. Disponível em: <<http://www.hbm.com/>>.
12. HORNER. **Industrial Services**, 2011. Disponível em: <<http://hornerelectric.thomasnet.com/category/motors?&bc=100>>.
13. MEURER, E. J. et al. **Análise e Comparação de Aparelhos para Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas de Aço ao Silício**. São Paulo: In 6^o CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2004.

14. SILVA JÚNIOR, P. A. **Bancada para Ensaio de Materiais Ferromagnéticos em Chapa Única Sob Campos Rotacionais.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica).
15. BATISTELA, N. J. **Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço ao Silício.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica).
16. BATISTELA, N. J. **Inversor de Tensão com Saída Senoidal Controlado por Modo Deslizante com Frequência Fixa.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica).
17. NI LabVIEW. **Improving the Productivity of Engineers and Scientists,** 2011. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview>>.
18. ESPÍNDOLA, A. A. **Avaliação das Perdas Magnéticas em Dispositivos Submetidos a Campos Magnéticos Girantes.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica).
19. BARBI, I. **Eletrônica de Potência: Projetos de Fontes Chaveadas.** Florianópolis: Edição do Autor, 2001.
20. MARTINS, D. C.; BARBI, I. **Eletrônica de Potência: Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA.** Florianópolis: Edição dos Autores, 2005.
21. LANDGRAF, F. J. G. **Propriedades Magnéticas de Aços para Fins Elétricos.** Rio de Janeiro: Primeira Edição, 2002. 109-128 p.
22. MAGNETIC Materials. **Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Electrical Steel Sheet and Strip by Means of an Epstein Frame, IEC Standard 404-2,** 1996-03.
23. FIORILO, F.; NOVIKOV, A. **An Improved Approach to Power Losses in Magnetic.** EUA: IEE Transactions on Magnetics, v. 26, 1990. 2904-2910 p.
24. FIORILO, F.; NOVIKOV, A. **Power Losses under Sinusoidal, Trapezoidal and Distorted.** EUA: IEE Transactions on Magnetics, v. 26, 1990. 2559-2561 p.

8 ANEXOS

8.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA O MATERIAL M1 COM A BANCADA EXPERIMENTAL

Tabela 8.1: Resultados obtidos com a bancada experimental para o material M1.

B (T)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
1,80	9,16	9,64	9,26	9,39	9,40	9,26	9,20	9,53	9,43	9,46
1,73	8,00	8,46	8,06	8,27	8,31	8,21	8,11	8,38	8,31	8,36
1,66	7,00	7,46	7,04	7,29	7,34	7,29	7,16	7,40	7,33	7,40
1,59	6,15	6,59	6,17	6,43	6,50	6,48	6,33	6,55	6,48	6,57
1,52	5,42	5,85	5,42	5,68	5,76	5,77	5,60	5,81	5,73	5,84
1,45	4,78	5,20	4,79	5,03	5,11	5,14	4,97	5,17	5,08	5,21
1,38	4,24	4,64	4,24	4,46	4,54	4,59	4,41	4,61	4,52	4,65
1,31	3,77	4,14	3,77	3,96	4,03	4,09	3,93	4,11	4,02	4,15
1,24	3,35	3,69	3,35	3,51	3,59	3,65	3,50	3,67	3,58	3,70
1,17	2,98	3,29	2,99	3,12	3,19	3,25	3,12	3,27	3,19	3,30
1,10	2,65	2,92	2,65	2,77	2,82	2,89	2,77	2,90	2,84	2,93
1,03	2,34	2,57	2,35	2,46	2,50	2,56	2,46	2,56	2,51	2,59
0,96	2,06	2,25	2,07	2,16	2,19	2,25	2,17	2,24	2,21	2,27
0,89	1,80	1,95	1,81	1,89	1,91	1,96	1,90	1,95	1,93	1,97
0,82	1,55	1,67	1,56	1,64	1,65	1,68	1,64	1,67	1,66	1,70
0,75	1,32	1,43	1,32	1,39	1,40	1,42	1,38	1,41	1,39	1,44

8.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA O MATERIAL M2 COM A BANCADA EXPERIMENTAL

Tabela 8.2: Resultados obtidos com a bancada experimental para o material M2.

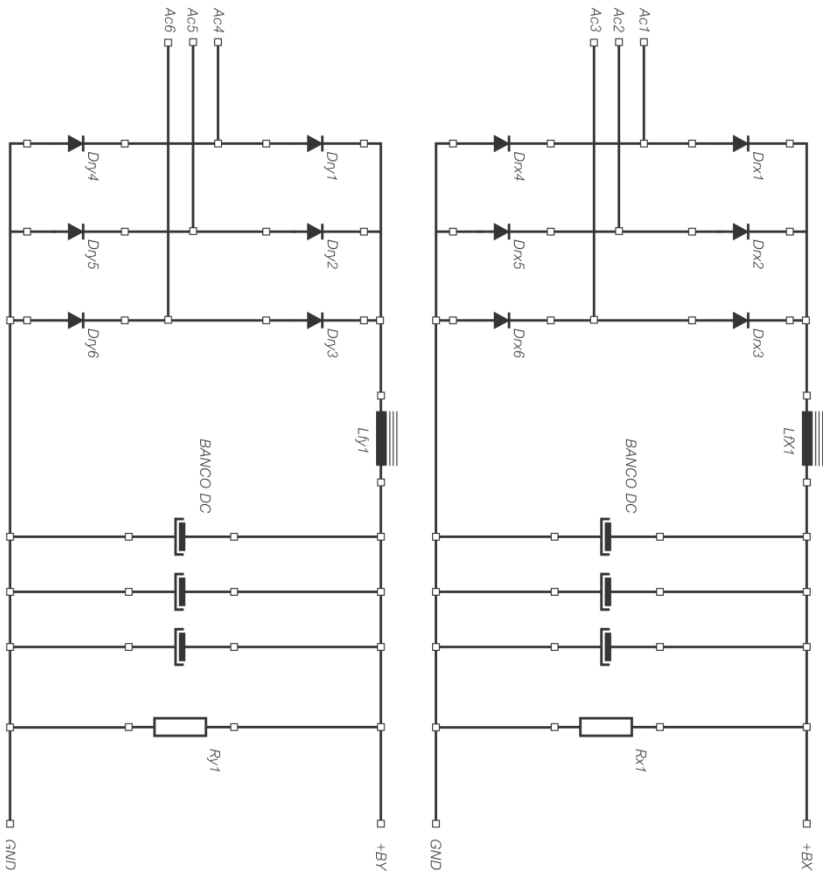
B (T)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
1,80	9,68	9,84	9,58	10,1	9,76	9,78	9,76	9,89	9,60	10,1
1,73	8,50	8,70	8,39	8,84	8,60	8,65	8,57	8,72	8,42	8,92
1,66	7,47	7,71	7,36	7,75	7,59	7,65	7,54	7,71	7,40	7,87
1,59	6,58	6,85	6,48	6,82	6,70	6,78	6,66	6,83	6,52	6,96
1,52	5,81	6,10	5,72	6,02	5,93	6,02	5,89	6,06	5,76	6,17
1,45	5,14	5,43	5,06	5,34	5,26	5,35	5,23	5,39	5,10	5,48
1,38	4,55	4,85	4,49	4,74	4,66	4,76	4,65	4,80	4,53	4,88
1,31	4,04	4,33	3,99	4,22	4,15	4,23	4,15	4,27	4,03	4,35
1,24	3,59	3,87	3,55	3,77	3,69	3,77	3,70	3,81	3,59	3,87
1,17	3,19	3,44	3,16	3,36	3,28	3,35	3,29	3,39	3,19	3,45
1,10	2,83	3,06	2,80	2,98	2,91	2,97	2,93	3,01	2,83	3,06
1,03	2,50	2,70	2,48	2,64	2,58	2,63	2,59	2,66	2,50	2,71
0,96	2,20	2,37	2,18	2,32	2,27	2,31	2,28	2,34	2,20	2,38
0,89	1,92	2,06	1,91	2,02	1,98	2,01	1,98	2,04	1,92	2,07
0,82	1,66	1,77	1,65	1,74	1,71	1,73	1,71	1,76	1,65	1,78
0,75	1,41	1,51	1,40	1,47	1,45	1,46	1,45	1,49	1,40	1,51

8.3 RESULTADOS OBTIDOS PARA O MATERIAL M3 COM A BANCADA EXPERIMENTAL

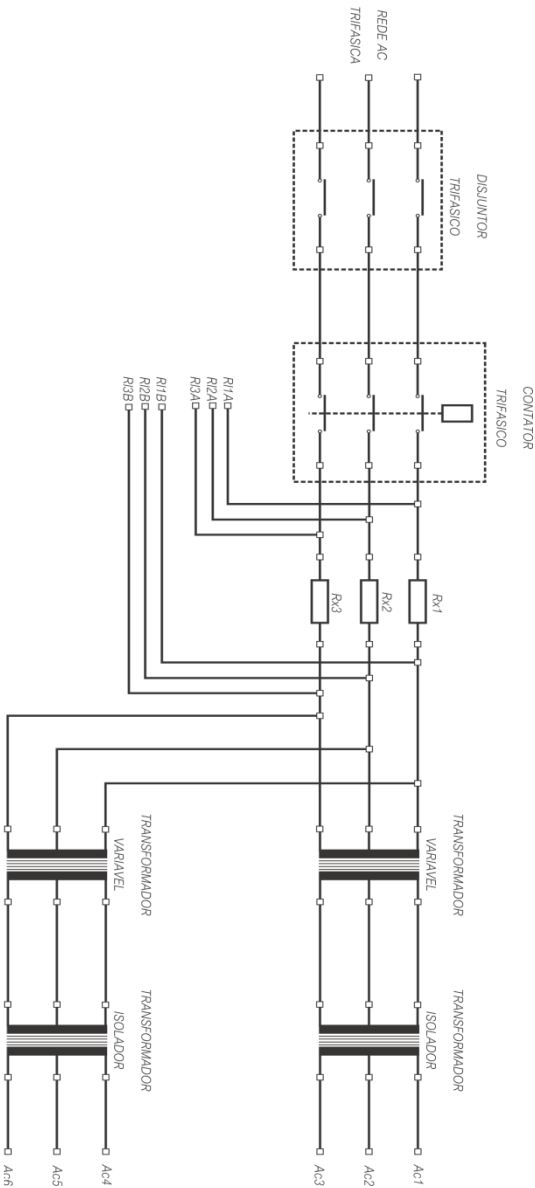
Tabela 8.3: Resultados obtidos com a bancada experimental para o material M3.

B (T)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
1,80	9,48	9,04	8,61	9,16	8,91	9,41	9,16	9,17	9,40	9,25
1,73	8,37	7,97	7,59	8,05	7,90	8,34	8,10	8,07	8,28	8,14
1,66	7,41	7,05	6,71	7,10	7,00	7,42	7,18	7,12	7,32	7,17
1,59	6,58	6,26	5,95	6,29	6,21	6,60	6,38	6,29	6,47	6,33
1,52	5,86	5,59	5,29	5,58	5,52	5,89	5,69	5,57	5,74	5,61
1,45	5,23	5,00	4,71	4,97	4,91	5,27	5,08	4,94	5,10	4,97
1,38	4,67	4,48	4,21	4,44	4,37	4,72	4,55	4,40	4,54	4,42
1,31	4,18	4,02	3,77	3,97	3,89	4,23	4,08	3,92	4,05	3,94
1,24	3,74	3,61	3,37	3,55	3,46	3,79	3,66	3,49	3,61	3,51
1,17	3,34	3,23	3,01	3,16	3,08	3,39	3,28	3,11	3,22	3,14
1,10	2,98	2,89	2,68	2,82	2,74	3,02	2,93	2,76	2,86	2,79
1,03	2,64	2,56	2,37	2,49	2,43	2,68	2,60	2,45	2,54	2,48
0,96	2,33	2,25	2,08	2,19	2,15	2,37	2,30	2,16	2,24	2,19
0,89	2,04	1,96	1,82	1,91	1,88	2,07	2,01	1,89	1,96	1,92
0,82	1,76	1,70	1,57	1,65	1,64	1,80	1,74	1,63	1,70	1,66
0,75	1,51	1,45	1,34	1,41	1,40	1,54	1,49	1,40	1,45	1,41

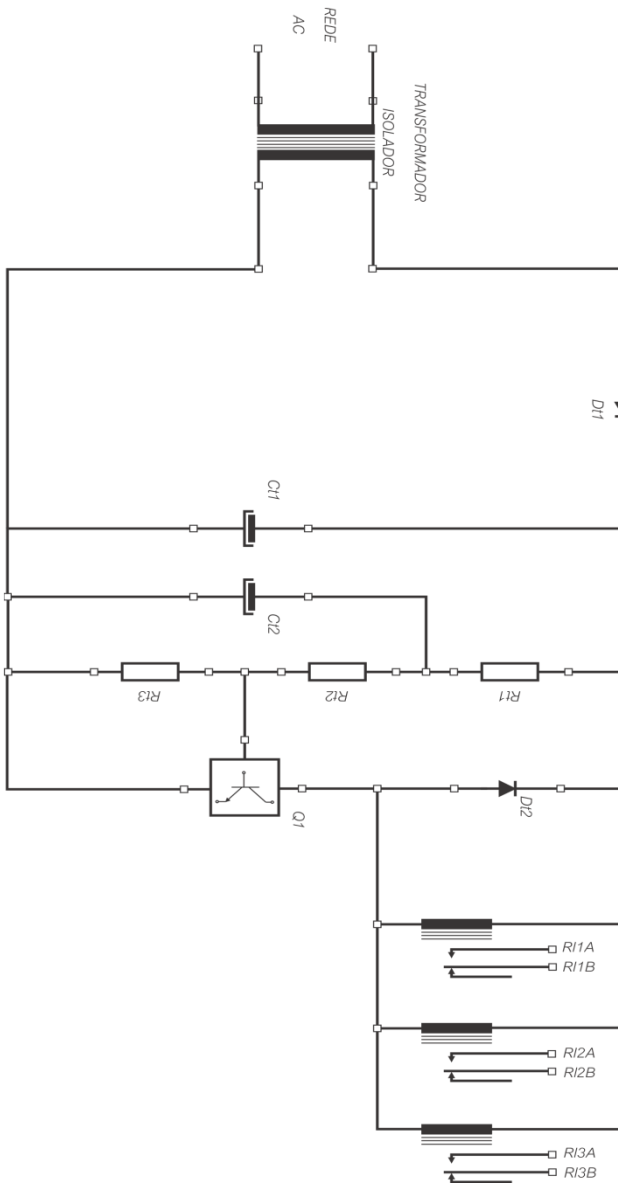
8.4.2 Circuito de Retificação e Filtragem



8.4.3 Sistema de Alimentação e Proteção



8.4.4 Temporizador



8.4.5 Circuito de Aquisição

